



M 2016

ANÁLISE COMPARATIVA DE REGULAMENTAÇÃO INTERNACIONAL EM AÇÕES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

JOÃO RUI MARQUES DA SILVA SIMÕES MARRANA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
MIEC – MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE COMPARATIVA DE REGULAMENTAÇÃO INTERNACIONAL EM AÇÕES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

JOÃO RUI MARQUES DA SILVA SIMÕES MARRANA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Nelson Saraiva Vila Pouca

Coorientador: Engenheiro José Carlos de Almeida Gouveia Lello

JULHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À memória dos meus avós Rui Fausto e José Augusto,
Ao meu pai, o meu primeiro engenheiro, e à minha mãe: devo-lhes tudo.

"We build too many walls and not enough bridges."

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Na hora da conclusão desta dissertação fica muito presente a ideia de que ela não teria sido possível sem o contributo precioso de várias pessoas. Desta forma, o autor pretende deixar por escrito algumas considerações sobre este assunto, tendo noção de que, enquanto que as eventuais falhas desta publicação serão da sua exclusiva responsabilidade, os méritos do trabalho são também fruto do labor e dedicação de muitas outras pessoas. Apresentam-se assim, na primeira pessoa, as linhas seguintes, na certeza de que serão inevitavelmente insuficientes e incompletas.

Ao Professor Doutor Nelson Vila Pouca, meu orientador, por todo o conhecimento e experiência que emprestou a esta dissertação, pelas horas que dispensou a ajudar a definir-lhe um rumo e por garantir que eu nunca deixasse de ter presente a responsabilidade que é publicar um trabalho pela FEUP.

Ao Engenheiro José Lello, meu coorientador, pela disponibilidade que demonstrou sempre que lhe foi pedido auxílio e pela experiência e cultura de engenharia que me dispensou nessas ocasiões.

À CCAD – Serviços de Engenharia, Lda. pelos meios que disponibilizou, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

À equipa da CCAD, pela forma como me receberam ao longo dos meses que partilhei com eles, em particular ao Miguel Carvalho pela assistência com os modelos e na disponibilização de material e elementos de projeto.

A todos os muitos e bons amigos que me acompanharam durante estes cinco anos do MIEC, por terem ajudado a fazer deste período um marco na minha vida. Um agradecimento especial ao Hugo Morais, por todas as vezes em que me livrou do insucesso, mas sobretudo pela sua amizade.

Finalmente – mas nunca menos importante – à minha família, não só pela ajuda concreta que deram, mesmo quando não lhes era pedida, ao longo dos cinco anos de curso e concretamente durante a realização da dissertação, mas sobretudo por serem garante de estabilidade e por nunca me deixarem sozinho. Um agradecimento especial aos meus pais, às minhas avós, aos meus irmãos, à minha madrinha, à Aninhas e à Inês: devo-lhes muito mais do que estas linhas.

RESUMO

Num contexto de cada vez maior internacionalização das sociedades, que se faz sentir também no setor da Engenharia Civil, a capacidade de projetar estruturas integradas em ambientes distintos, nomeadamente no que concerne à sua localização, torna-se numa mais valia para qualquer engenheiro. É, portanto, relevante para os projetistas de pontes o conhecimento da diferente regulamentação utilizada em cada país ou região, nomeadamente das especificações quanto às ações rodoviárias a considerar.

No presente trabalho são analisados os esforços dominantes em pontes sujeitas às ações prescritas em dez regulamentos de diferentes países ou regiões (Portugal, Europa, Brasil, Estados Unidos, África Austral, Canadá, Índia, Rússia, Hong Kong e Colômbia). A análise é feita através da modelação de dois tipos de ponte – tabuleiro de vigas pré-fabricadas e tabuleiro em laje nervurada betonado *in situ* – com recurso ao método dos elementos finitos e variando o comprimento dos vãos num intervalo entre 10m e 40m.

Numa primeira parte é apresentada uma breve descrição dos temas mais comuns tratados nos regulamentos, que serão posteriormente analisados no trabalho. Segue-se uma exposição sobre os modelos adotados e a forma como estes são consequência do âmbito do trabalho e dos aspetos regulamentares. Posteriormente procede-se à análise comparativa dos esforços obtidos nas estruturas mediante a aplicação das várias ações regulamentares.

Para a realização desta análise são formulados modelos estruturais que procuram representar adequadamente a realidade estudada, bem como permitir a extrapolação de conclusões e a comparação dos resultados entre os diversos casos de estudo. Por esse motivo, a modelação foi sempre realizada na tentativa de criar modelos tão generalistas quanto possível.

A análise comparativa foca sobretudo os esforços na direção longitudinal (momento fletor e esforço transversal), estudando também, no primeiro caso de estudo, os momentos fletores positivos e negativos na direção transversal. Pretende-se não apenas comparar os efeitos resultantes de cada ação, mas também avaliar de que forma o peso próprio tem influência nos esforços de cálculo, mitigando as diferenças entre os vários regulamentos ou, eventualmente, agravando-as.

Com esse objetivo, são apresentados sob a forma de tabelas os valores dos esforços nas estruturas resultantes da aplicação de forma isolada – ou seja, sem a aplicação do peso próprio – de cada modelo de carga de todos os regulamentos analisados. Posteriormente apresentam-se os efeitos da aplicação do modelo de carga mais gravoso de cada regulamento tanto isoladamente como em combinação com o peso próprio. Estes resultados são apresentados em gráficos de barras e de forma comparativa, ou seja, em relação a um regulamento base. Assumiu-se como regulamento base o Regulamento de Segurança e Ações de Portugal.

Antes de terminar, e com o objetivo de validar o estudo concretizado e testar a sua aplicabilidade a circunstâncias reais, são aplicadas as cargas de cinco regulamentos (Portugal, Europa, Estados Unidos, Brasil e África Austral) a um caso prático de uma estrutura real.

PALAVRAS-CHAVE: Pontes, Pontes Rodoviárias, Regulamentação Internacional, Ações Rodoviárias.

ABSTRACT

In a context of increasing internationalization of societies, that is also felt in the civil engineering sector, the ability to design structures in different environments, particularly with regard to its location, becomes an asset to any engineer. It is therefore relevant for bridge designers the knowledge of the different norms or regulations used in each country or region, including the specification on which traffic actions to consider.

This paper analyses the dominant internal forces in bridges under the actions prescribed in ten regulations from different countries or regions (Portugal, Europe, Brazil, United States, Southern Africa, Canada, India, Russia, Hong Kong and Colombia). The analysis is done by modelling two types of bridge – precast beams deck and single longitudinal rib deck cast in place.

The first part is a brief description of the most common issues dealt within the regulations, which will be later analysed in the paper. The following is a description of the adopted models and how these are a consequence of the scope of the paper and of the regulatory aspects. Later, is made a comparative analysis of the effects in the structures when various regulatory actions are applied.

For this analysis, one formulated structural models that seek to adequately represent the reality studied, as well as to allow the extrapolation of conclusions and the comparison of results between the different case studies. For this reason, the modelling was always held in an attempt to make the models as general as possible.

The comparative analysis focuses primarily on the effects in the longitudinal direction (bending moment and shear), studying also, in the first case study, the negative and positive bending moments in the transverse direction. It is intended not only to compare the effects of each action, but also to evaluate in what way the self-weight has influence on the calculation of bending moment and shear force, reducing the differences between the various regulations or eventually aggravating them.

For this purpose, the values of the bending moment and shear force in the structures resulting from isolated application of each load model from each regulation analysed - that is without the application of self-weight – are presented in the form of tables. Subsequently are presented the effects of applying the most onerous load model of each regulation either alone or in combination with the self-weight. These results are presented in bar graphs and in a comparative form, ie in relation to a base regulation. The Portuguese *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes* (Regulation of Safety and Actions for Building and Bridge Structures) was assumed as the base regulation.

Before concluding, and in order to validate the implemented study and test its applicability to real circumstances, the loads of five regulations (Portugal, Europe, USA, Brazil and Southern Africa) are applied to a practical case of a real structure.

KEYWORDS: Bridges, Road Bridges, International Regulation, Traffic Actions.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1 ASPETOS GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
 2 ASPETOS REGULAMENTARES.....	 5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 DIVISÃO DA FAIXA DE RODAGEM	5
2.3 TIPOS DE CARGA	6
2.3.1 VEÍCULOS	7
2.3.2 CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS	11
2.3.3 CARGAS LINEARMENTE DISTRIBUÍDAS	12
2.4 MÚLTIPLA PRESENÇA DE VEÍCULOS	12
2.5 AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA	13
2.6 COMPOSIÇÃO E INTENSIDADE DO TRÁFEGO E CLASSES DE PONTES	14
2.7 COMBINAÇÕES DE CARGAS	15
2.8 OUTROS ASPETOS	16
2.9 SÍNTESE DOS REGULAMENTOS	18
 3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS	 21
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 MODELO ESTRUTURAL.....	22
3.2.1 ASPETOS GERAIS	22
3.2.2 SISTEMA ESTRUTURAL LONGITUDINAL E TIPO DE APOIOS	22
3.2.3 AÇÕES CONSIDERADAS	23
3.2.4 CARGAS MÓVEIS	25
3.2.5 POSIÇÃO RELATIVA DAS SECÇÕES	27

3.3 1º CASO DE ESTUDO – TABULEIRO DE VIGAS PRÉ-FABRICADAS	28
3.4 2º CASO DE ESTUDO – TABULEIRO EM LAJE NERVURADA	32
4 ESTUDO COMPARATIVO	39
4.1 INTRODUÇÃO	39
4.2 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS E DISPOSIÇÃO DOS RESULTADOS	40
4.2.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS	40
4.2.2 DISPOSIÇÃO DOS RESULTADOS	41
4.3 TABULEIRO DE VIGAS PRÉ-FABRICADO	42
4.3.1 ASPETOS GERAIS	42
4.3.2 VÃO DE 10M	44
4.3.2.1 Direção Longitudinal	44
4.3.2.2 Direção Transversal	46
4.3.3 VÃO DE 15M	47
4.3.3.1 Direção Longitudinal	47
4.3.3.2 Direção Transversal	49
4.3.4 VÃO DE 20M	50
4.3.4.1 Direção Longitudinal	50
4.3.4.2 Direção Transversal	52
4.3.5 VÃO DE 25M	53
4.3.5.1 Direção Longitudinal	53
4.3.5.2 Direção Transversal	55
4.3.6 VÃO DE 30M	56
4.3.6.1 Direção Longitudinal	56
4.3.6.2 Direção Transversal	58
4.3.7 VÃO DE 40M	59
4.3.7.1 Direção Longitudinal	59
4.3.7.2 Direção Transversal	61
4.3.8 COMPARAÇÃO GLOBAL	61
4.3.8.1 Momento Fletor	61
4.3.8.2 Esforço Transverso	63
4.3.9 COMPARAÇÃO ENTRE RSA E EC1-2	64
4.4 TABULEIRO EM LAJE NERVURADA	66

4.4.1	ASPETOS GERAIS	66
4.4.2	VÃO DE 10M.....	66
4.4.3	VÃO DE 15M.....	68
4.4.4	VÃO DE 20M.....	70
4.4.5	VÃO DE 25M.....	72
4.4.6	VÃO DE 30M.....	74
4.4.7	COMPARAÇÃO GLOBAL	76
4.4.7.1	Momento Fletor	76
4.4.7.2	Esforço Transverso	77
4.4.8	COMPARAÇÃO ENTRE RSA E EC1-2.....	79
4.5	CONCLUSÕES	80
5	CASO PRÁTICO	81
5.1	INTRODUÇÃO.....	81
5.2	DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE	82
5.3	ANÁLISE DOS EFEITOS DAS AÇÕES REGULAMENTARES.....	84
5.3.1	ASPETOS GERAIS	84
5.3.2	ANÁLISE COMPARATIVA	85
5.3.2.1	Direção Longitudinal.....	85
5.3.2.2	Direção Transversal	86
5.3.3	COMPARAÇÃO COM O 1º CASO DE ESTUDO.....	87
5.4	CONCLUSÕES	88
6	CONCLUSÃO	89
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Veículo genérico	7
Fig. 2.2 – Veículos SOV (BSI, 2003)	8
Fig. 2.3 – Exemplos de cargas uniformemente distribuídas.....	11
Fig. 2.4 – Respostas estática e dinâmica (Calçada, 2001).....	13
Fig. 2.5 – Características do veículo de <i>Class 70R</i> (IRC, 2014).....	17
Fig. 2.6 – Esquema da disposição das cargas do veículo da CAN/CSA-S6-06	18
Fig. 3.1 – Peso próprio em função do vão (Manterola, 2006).....	24
Fig. 3.2 – Janelas de modelação de cargas móveis – <i>Robot Structural Analysis</i>	26
Fig. 3.3 – Posição da laje em relação às vigas	27
Fig. 3.4 – Secção transversal e perfil da via do tabuleiro de vigas pré-fabricadas.....	30
Fig. 3.5 – Exemplo de viga pré-fabricada	31
Fig. 3.6 – Exemplo de um modelo de tabuleiro de vigas pré-fabricadas – <i>Robot Structural Analysis</i> ..	32
Fig. 3.7 – Aligeiramento de secções transversais de tabuleiros em laje (Reis, 2006).....	33
Fig. 3.8 – Secção transversal e perfil da via do tabuleiro em laje nervurada	35
Fig. 3.9 – Secção-tipo do tabuleiro em laje nervurada.....	36
Fig. 3.10 – Exemplo de um modelo de tabuleiro em laje vigada – <i>Robot Structural Analysis</i>	37
Fig. 4.1 – Posição de um veículo em relação a vigas longitudinais	43
Fig. 4.2 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 10m)	45
Fig. 4.3 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 10m)	45
Fig. 4.4 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 15m)	48
Fig. 4.5 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 15m)	48
Fig. 4.6 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 20m)	51
Fig. 4.7 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 20m)	51
Fig. 4.8 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 25m)	54
Fig. 4.9 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 25m)	54
Fig. 4.10 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 30m)	57
Fig. 4.11 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 30m)	57
Fig. 4.12 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 40m)	60
Fig. 4.13 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 40m)	60
Fig. 4.14 – Representação tridimensional do momento fletor na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro vigado)	62
Fig. 4.15 – Representação tridimensional do esforço transversal na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro vigado)	63
Fig. 4.16 – Rácio entre o momento fletor relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro vigado).....	65
Fig. 4.17 – Rácio entre o esforço transversal relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro vigado).....	65

Fig. 4.18 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m).....	67
Fig. 4.19 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m).....	67
Fig. 4.20 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m).....	69
Fig. 4.21 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m).....	69
Fig. 4.22 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m).....	71
Fig. 4.23 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m).....	71
Fig. 4.24 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m).....	73
Fig. 4.25 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m).....	73
Fig. 4.26 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m).....	75
Fig. 4.27 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m).....	75
Fig. 4.28 – Representação tridimensional do momento fletor na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)	76
Fig. 4.29 – Representação tridimensional do esforço transversal na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)	78
Fig. 4.30 – Rácio entre o momento fletor relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro em laje nervurada).....	79
Fig. 5.1 – PS10 do lanço “Avelar Sul – Avelar Norte” do “IC3 – Tomar / Coimbra”	82
Fig. 5.2 – Perfil transversal da Passagem Superior PS10	83
Fig. 5.3 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (PS10).....	85
Fig. 5.4 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (PS10)	86
Fig. 5.5 – Rácios entre os momentos flectores relativos ao EC1-2 e os relativos ao RSA – Valores do 1º caso de estudo e do caso prático	87
Fig. 5.6 – Rácios entre os esforços transversos relativos ao EC1-2 e os relativos ao RSA – Valores do 1º caso de estudo e do caso prático.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Veículos regulamentares adotados	10
Tabela 2.2 – Fatores parciais de segurança para ações variáveis e permanentes de cada regulamento .15	
Tabela 2.3 – Resumo das características mais relevantes dos modelos de carga regulamentares	19
Tabela 3.1 – Dimensões das Vigas Pré-fabricadas.....	31
Tabela 3.2 – Dimensões das secções dos tabuleiros em laje	36
Tabela 4.1 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 10m).....	44
Tabela 4.2 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 10m).....	46
Tabela 4.3 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 15m).....	47
Tabela 4.4 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 15m).....	49
Tabela 4.5 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 20m).....	50
Tabela 4.6 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 20m).....	52
Tabela 4.7 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 25m).....	53
Tabela 4.8 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 25m).....	55
Tabela 4.9 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 30m).....	56
Tabela 4.10 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 30m).....	58
Tabela 4.11 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 40m).....	59
Tabela 4.12 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 40m).....	61
Tabela 4.13 – Rácio entre o momento fletor na estrutura para cada regulamento em relação ao RSA e em função do vão (tabuleiro vigado).....	62
Tabela 4.14 – Rácio entre o esforço transverso na estrutura para cada regulamento em relação aorsa e em função do vão (tabuleiro vigado).....	64
Tabela 4.15 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m).....	66
Tabela 4.16 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m).....	68
Tabela 4.17 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m).....	70
Tabela 4.18 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m).....	72
Tabela 4.19 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m).....	74
Tabela 4.20 – Rácio entre o momento fletor na estrutura para cada regulamento em relação ao RSA e em função do vão (tabuleiro em laje nervurada).....	77

Tabela 4.21 – Rácio entre o esforço transversal na estrutura para cada regulamento em relação aorsa e em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)	78
Tabela 5.1 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (PS10).....	85
Tabela 5.2 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (PS10).....	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

L – Comprimento do Vão

M_l – Momento fletor na direção longitudinal

M_t – Momento fletor na direção transversal

Q – Carga Variável

V – Esforço transversal

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

w_l – Largura da via

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

γ_i – Coeficiente parcial de segurança associado ao parâmetro i

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCAD – C.C.A.D. – Serviços de Engenharia, Lda

CSA – *Canadian Standards Association*

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DL – Decreto-Lei

EC1-2 – Eurocódigo 1: Acções em estruturas. Parte 2: Acções de tráfego em pontes

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

IRC – Indian Roads Congress

LRFD – *Load & Resistance Factor Design*

NBR – Norma Brasileira

NCP – *Norma Colombiana de Puentes*

PP – Peso Próprio

PS – Passagem Superior

REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado

REAE – Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios

RSA – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes

SATCC – *Southern Africa Transport and Communications Commission*

SDM-HK – *Structures Design Manual for Highways and Railways* (Hong Kong)

SNiP – Normas de Construção Russas

ABREVIATURAS

Fig – Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPETOS GERAIS

A recente crise no sector da construção civil e obras públicas em Portugal levou a que muitas empresas afetas a esse ramo de atividade recorressem à internacionalização como forma de subsistir. Os mercados estrangeiros serviram às empresas nacionais como meio de angariar negócios que escasseavam dentro de fronteiras. Em 2009, por exemplo, um estudo afirmava que cerca de 70% das empresas de construção e obras públicas consultadas pretendia reforçar a sua presença nos mercados externos onde atuava (ANEOP & Deloitte, 2009 apud Caixa Imobiliário, 2009).

Para as empresas de projeto, esta internacionalização exigiu a utilização de códigos e regulamentos estrangeiros que até agora não eram usados com tanta regularidade. O estudo da regulamentação internacional com vista à sua posterior aplicação não constitui, de forma geral, uma tarefa excessivamente complexa para projetistas acostumados a trabalhar com os regulamentos nacionais, uma vez que os princípios que os regem são, em geral, idênticos. Pelo contrário, para conhecer mais profundamente a regulamentação estrangeira e os seus efeitos nas estruturas de forma a otimizar as decisões relacionadas com o dimensionamento é necessário acumular experiência com vários projetos, o que pode demorar anos. Neste sentido, a investigação relacionada com a regulamentação internacional e as suas implicações em projetos de estruturas constitui uma ferramenta importante no processo de desenvolvimento de experiência e *know-how* do sector.

Esta publicação surge no sentido de estudar um tema específico associado ao assunto abordado acima: os efeitos das ações prescritas por regulamentos internacionais em pontes. Os regulamentos a analisar e as regiões geográficas a que dizem respeito são os seguintes:

- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (DL 235/83, 1983) – Portugal
- *Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges* (BSI, 2003) – Europa
- Norma Brasileira 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas (ABNT, 2013) – Brasil
- *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2012) – Estados Unidos
- *SATCC Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts* (SATCC, 2001) – África Austral
- *Canadian Highway Bridge Design Code* (CSA, 2006) – Canadá
- *Standard Specifications and Code of Practice for Road Bridges* (IRC, 2014) – Índia
- *Construction Norms: Bridges and Culverts* (SNiP, 1986) – Rússia
- *Structures Design Manual for Highways and Railways* (Highways Department, 2013) – Hong Kong

- *Norma Colombiana de Diseño de Puentes: CCP 14* (INVIAS & AIS, 2014) – Colômbia

Também no âmbito da transição definitiva em Portugal do RSA e restantes regulamentos estruturais (REBAP, REAE, etc.) para os Eurocódigos – que se prevê que aconteça a curto prazo – ganham utilidade publicações que relacionem não só as características de uns e outros como os efeitos da sua aplicação no dimensionamento e verificação de estruturas.

Dado o elevado grau de complexidade e a vasta gama de aspetos que é necessário considerar no dimensionamento dos diferentes elementos de uma ponte, e tendo em conta a profundidade pretendida para a abordagem a realizar, houve a necessidade de adotar determinadas simplificações e de descartar alguns aspetos do estudo. Pretende-se assim focar a análise em assuntos demarcados que sejam determinantes no projeto de pontes rodoviárias, realizando uma análise detalhada e pertinente dos temas abordados.

Dessa forma, o estudo será centrado em vãos únicos simplesmente apoiadas de duas tipologias de tabuleiro: tabuleiro de vigas pré-fabricadas e tabuleiro em laje de nervura única betonado *in situ*. Para a primeira tipologia, e para cada um dos dez regulamentos, são analisados vãos de 10m, 15m, 20m, 25m, 30m e 40m. Na análise da segunda tipologia foram considerados os mesmos vãos, à exceção do de 40m. Os efeitos serão estudados ao nível dos esforços na estrutura, nomeadamente os momentos fletores nas direções longitudinal e transversal e o esforço transversal apenas na direção longitudinal. No terceiro capítulo serão descritos com maior detalhe os modelos utilizados, bem como as razões que conduziram a cada uma das opções tomadas na sua formulação.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos de âmbito geral desta dissertação decorrem da conjuntura em que ela é desenvolvida, nomeadamente do facto de esta surgir como conclusão de um ciclo de Mestrado Integrado em Engenharia Civil e concretamente de uma especialização no ramo de estruturas. Assim, a tese pretende ser produto não só do semestre em que foi desenvolvida, mas também dos restantes anos de estudo e integrar conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

Consequência de ser uma dissertação realizada em ambiente empresarial, esta adquire conjuntamente o propósito de fornecer um documento com interesse para projetistas de pontes, em particular para a empresa na qual foi desenvolvida a investigação, a C.C.A.D. – Serviços de Engenharia, Lda (daqui em diante referida como CCAD). Este facto transparece no tema de estudo e na forma como os desafios são abordados, estando estes aspetos subordinados à intenção de extrair conclusões pertinentes e com aplicabilidade prática no projeto de pontes rodoviárias.

Para cumprir estes objetivos primordiais, foram estabelecidos vários desígnios específicos, a saber:

- Elaborar modelos simplificados de estruturas de pontes rodoviárias que permitam analisar com o nível de detalhe apropriado as problemáticas em questão;
- Comparar os efeitos provocados pelas ações fixadas por diversos regulamentos em pontes com características definidas;
- Avaliar a relevância do peso próprio estrutural face às ações variáveis definidas nos vários regulamentos, nomeadamente as rodoviárias, bem como estudar e perceber de que forma é que esta ação pode mitigar ou agravar as diferenças entre os efeitos da aplicação de cargas rodoviárias e cada regulamento.

- Validar o estudo e a sua aplicabilidade na prática corrente de engenharia através da análise de um caso prático real e ao mesmo tempo retirar conclusões relativas ao impacto da ação rodoviária prescrita pelos vários regulamentos nos esforços dominantes da estrutura do tabuleiro desta obra de arte.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, adotando a forma que se considerou mais eficaz no sentido de transmitir a informação ao leitor. Inicia-se no presente capítulo com uma introdução que pretende descrever o trabalho a realizar, os objetivos que com esta se pretendem alcançar e a sua organização.

O segundo capítulo tem como objetivo descrever os aspetos relativos aos regulamentos e a forma como estes são considerados no trabalho. Tomou-se a opção de não descrever de forma exaustiva cada um dos regulamentos, com o propósito de não tornar esta exposição demasiado pesada. Esta disposição decorre também do facto de que a presente dissertação não tem intenção de ser uma alternativa à consulta dos regulamentos. O capítulo termina com um quadro de resumo dos regulamentos.

No terceiro capítulo são apresentados os modelos estruturais utilizados, as suas características e as razões que levaram a concretizá-los dessa forma. De seguida inicia-se uma descrição de cada um dos dois casos de estudo: o tabuleiro de vigas pré-fabricadas e o tabuleiro em laje nervurada. É feita uma breve caracterização da tipologia, das suas aplicações e das suas principais vantagens e desvantagens. Posteriormente relata-se a forma como estes aspetos foram materializados nos modelos através do software de cálculo estrutural.

O capítulo 4 é reservado à análise dos dados. Inicia-se com uma reprodução da forma como é feita a análise, seguindo-se da exposição dos resultados. Os resultados são apresentados sob a forma de tabelas e gráficos de barras. As tabelas têm o fim de dar a conhecer a ordem de magnitude dos efeitos provocados pela aplicação isolada de cada modelo de carga regulamentar. Os gráficos exprimem o valor dos esforços provocados pela aplicação do modelo de carga mais gravoso de cada regulamento. Esse valor é dado em relação ao valor correspondente à aplicação das ações do RSA.

Dedica-se o quinto capítulo ao caso prático – designação adotada para distinguir dos casos de estudo tratados nos capítulos 3 e 4. Inicia-se com uma breve descrição da estrutura em causa e remata-se com a apresentação dos resultados da aplicação das ações regulamentares à nova estrutura. Neste capítulo são considerados apenas cinco dos dez regulamentos abordados no resto do trabalho.

Finalmente, o capítulo 6 conclui a publicação, fazendo uma apreciação geral do trabalho e sugerindo propostas para desenvolver no futuro a partir do trabalho realizado.

2

ASPETOS REGULAMENTARES

2.1 INTRODUÇÃO

A questão da definição de ações rodoviárias em pontes pode ser abordada de diferentes formas, mantendo um objetivo comum: formular modelos de carga suficientemente simples para que possam ser aplicados no quotidiano da engenharia de estruturas e que reproduzam de forma mais ou menos fiel e com um nível de segurança adequado os efeitos decorrentes das ações associadas ao tráfego de veículos. Quando se observa um número representativo de regulamentos sobre este assunto é natural que se encontrem várias diferenças, mas também aspetos comuns. De facto, ainda que entre cada um dos dez regulamentos analisados se identifiquem aspetos abordados de forma claramente distinta, existem também aspetos tratados de forma idêntica. Esta realidade faz-se sentir particularmente nos regulamentos que são assumidamente baseados em outros, como é o caso do *Código Colombiano de Diseño de Puentes* (NCP), baseado no regulamento Norte-Americano ou do *Structures Design Manual for Highways and Railways* de Hong Kong (SDM-HK), sustentado no Eurocódigo 1 – Parte 2 (EC1-2) e no respetivo Anexo Nacional Britânico.

Este capítulo pretende resumir as várias questões tratadas na diferente regulamentação observada e que têm pertinência para o presente trabalho, referindo brevemente a forma como cada regulamento aborda cada questão. Por este motivo, não serão tratados alguns assuntos importantes abordados nos regulamentos, por não serem objeto de estudo na presente dissertação. O capítulo termina com uma síntese dos 10 regulamentos estudados em forma de tabela.

2.2 DIVISÃO DA FAIXA DE RODAGEM

Um dos aspetos que importa considerar no dimensionamento ou verificação de pontes rodoviárias – e que à partida não se impõe, por exemplo, em pontes ferroviárias – é o do espaço por onde os veículos circulam. Mais do que a área onde, no projeto inicial, se prevê que estes circulem, importa ter em conta as zonas em que podem vir a circular no caso de se alterar a geometria da estrada (uma alteração, por exemplo, do número e da largura das vias de trânsito).

O Código da Estrada – (Lei 72/2013) decretada pela Assembleia da República Portuguesa – define Faixa de Rodagem como «parte da via pública especialmente destinada ao trânsito de veículos», não incluindo nela a berma, definida como «superfície da via pública não especialmente destinada ao trânsito de veículos e que ladeia a faixa de rodagem». Esta aceção, com sentido no campo de aplicação do código da estrada, difere da arrogada no âmbito deste trabalho, já que nesta última se considera que as bermas fazem parte da faixa de rodagem.

De facto, não só é quase certo que, ao longo da vida útil da estrutura, ocorram situações nas quais se dê o trânsito ou a paragem de veículos nas bermas – por razões de emergência, ou outras – como, na maioria dos casos, não é possível garantir que, a determinada altura desse período, os locais projetados como bermas não passem a constituir ou integrar vias de circulação comuns. Desta forma, os regulamentos decretam que, para efeitos de dimensionamento, se considerem as bermas como parte integrante da faixa de rodagem. Isto não quer necessariamente dizer que a distribuição das vias e bermas prevista no Estudo Rodoviário deva ser totalmente ignorada, significa sim, que a ser considerada ela deve assumir carácter meramente indicativo.

Assim, cada regulamento faz a sua divisão da faixa de rodagem – incluindo as bermas – em vias fictícias (também apelidadas de vias dedicadas, vias imaginárias, ou outras) em função da sua largura. É nestas vias fictícias que são posteriormente aplicadas as cargas de veículos, as cargas uniformemente distribuídas, ou outras.

Sem embargo, nem todos os regulamentos fazem esta distribuição. A norma brasileira prescreve a aplicação de um único veículo que pode circular em qualquer posição da faixa de rodagem. O regulamento português estabelece algo semelhante, mas com duas diferenças: o eixo do veículo deve estar sempre paralelo à faixa de rodagem e, no caso de pontes com duas faixas de rodagem destinadas a diferentes sentidos de circulação, podendo cada uma comportar pelo menos duas vias de tráfego, o veículo deve ser aplicado em cada uma das faixas ou em ambas em simultâneo – na prática corrente, isto significa que, nos casos em que haja uma separação física entre duas faixas de rodagem afetas a sentidos de tráfego opostos, se considera a ação de dois veículos. O regulamento Russo não indica como deve ser feita a divisão de vias, declarando apenas que devem ser consideradas as vias que produzam efeitos mais gravosos na estrutura e que o número de vias carregadas não deve ser superior ao número de vias de tráfego (Pereira, 2015).

2.3 TIPOS DE CARGA

A circulação de veículos em pontes rodoviárias pode ocorrer de formas muito diferentes e por conseguinte a carga que esses veículos exercem nas obras de arte depende de vários fatores como o peso bruto dos veículos, o número de eixos e o peso associado a cada um, a intensidade de tráfego e a sua composição entre veículos ligeiros e pesados de diferentes características, a velocidade de circulação, a situação de tráfego (fluído, lento ou congestionado), etc. A consideração de casos de carga que representem exatamente cada uma destas situações é uma tarefa inviável senão impossível, pelo que é importante criar cenários de carregamento que representem todas estas situações nas suas vertentes mais gravosas.

Assim, os diversos regulamentos estabelecem carregamentos que não pretendem representar exatamente os veículos que carregam as obras de arte, mas sim os efeitos que a sua circulação provoca na estrutura. O segundo modelo de carga do EC1-2, por exemplo, determina a utilização de um veículo de eixo único. Apesar do conceito de um veículo de eixo único ser algo irreal, ele pode representar de forma adequada e conservativa um veículo com um eixo muito mais carregado do que outro, caso que é muitas vezes condicionante na análise local de determinados elementos estruturais.

Ao acima exposto acresce o facto de estes parâmetros serem por vezes difíceis de aferir. Tomando a título de exemplo o peso bruto dos veículos: apesar de existir em Portugal legislação específica que limita este parâmetro (DL 99/2005) não seria prudente considerar esses valores como cargas atuantes devido à incapacidade de garantir que todos os veículos que circulam nas estradas portuguesas cumprem essas regras. Estes valores servem, no entanto, para prever os efeitos característicos devidos ao tráfego.

Com vista a resolver os problemas apresentados atrás, os regulamentos estabelecem diferentes tipos de carga a ser aplicados separadamente ou conjugados. Apresentam-se de seguida os tipos de carga presentes na regulamentação que foram aplicados neste trabalho.

2.3.1 VEÍCULOS

Os veículos são, naturalmente, o tipo de carga mais comum e o único presente em todos os regulamentos. Estes são normalmente definidos pelo número de eixos e respetiva localização, pelo número de rodas por eixo e distância entre si e pelo peso aplicado em cada eixo. Na Fig. 2.1 é apresentado um exemplo de um veículo genérico.

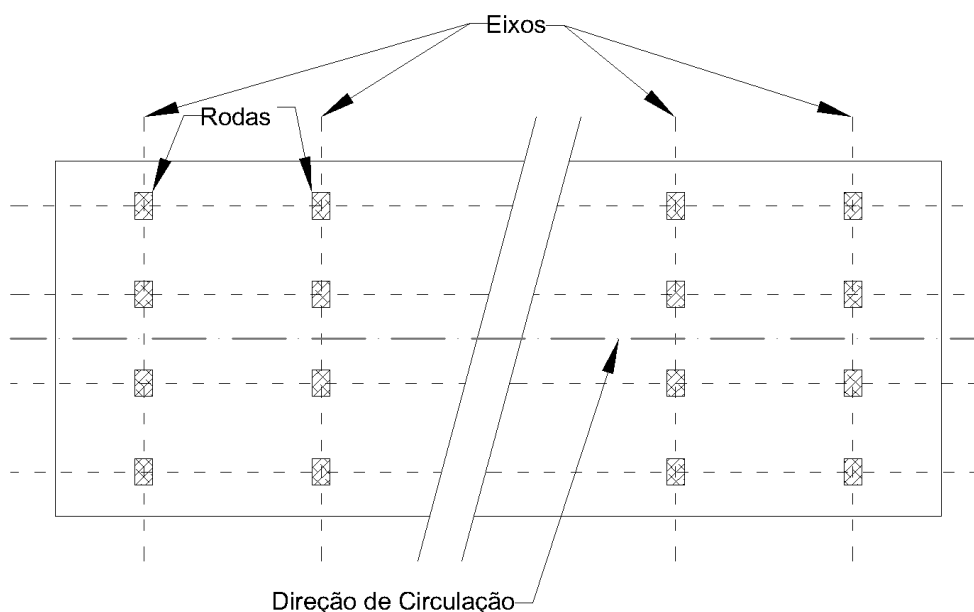


Fig. 2.1 – Veículo genérico

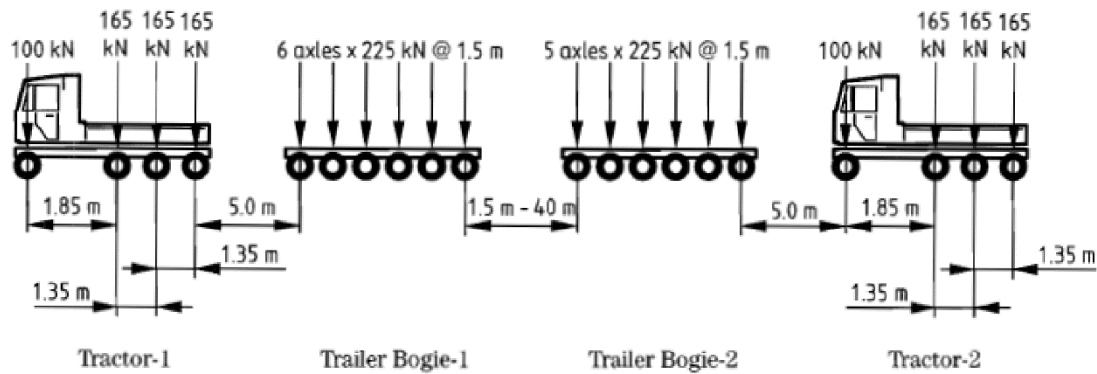
Cada roda materializa uma carga aplicada numa superfície definida pelo regulamento. A superfície de aplicação é uma característica importante para análises locais, que pode ser desprezada nas análises globais, como é o caso. Assim, por simplificação, as cargas das rodas foram, neste trabalho, modeladas como cargas pontuais.

Ainda que esta seja a forma mais comum de representar as cargas dos veículos, também existem, nomeadamente nos regulamentos Sul-Africano e Indiano, cargas distribuídas alusivas a veículos de rastros.

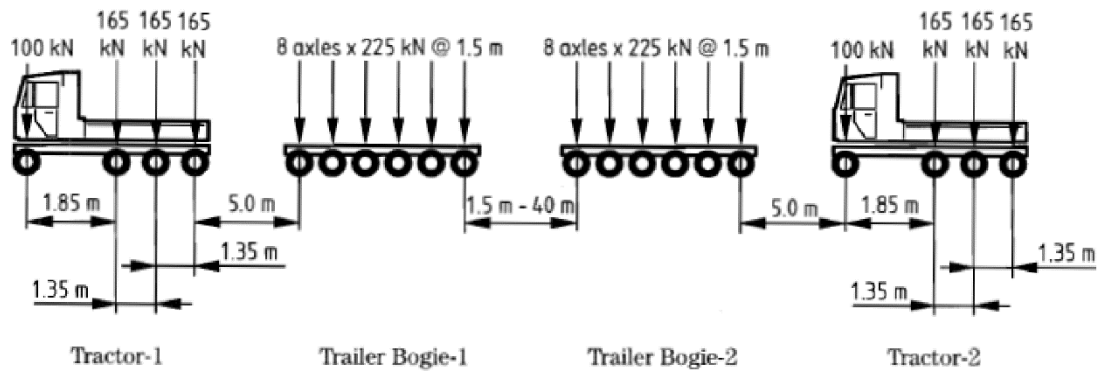
Uma estratégia adotada não raras vezes é a de agrupar os veículos em grupos de características semelhantes e nomeá-los de acordo com essas características – usualmente através de um conjunto de letras – deixando também presente na sua identificação o parâmetro que distingue cada um dos veículos de entre os vários que constituem uma tipologia. Normalmente este parâmetro é o peso bruto do veículo e é identificado por um número na sua designação. Por exemplo, no Anexo Nacional Britânico do EC1-2 são especificados vários veículos especiais para possível aplicação no Modelo de Carga 3 (ver 2.8), nomeadamente o SOV-250, o SOV-350, o SOV-450 e o SOV-600 (na Fig. 2.2 estão representados, a título de exemplo, o SOV-250 (a) e o SOV-350 (b) em alçado, bem como um eixo genérico (c), em

planta). Todos estes veículos têm as mesmas características geométricas (espaçamento entre eixos, espaçamento entre rodas de um mesmo eixo, etc.) e a mesma carga aplicada nos eixos semelhantes, diferindo no número de eixos em cada módulo e consequentemente na carga total do veículo.

(a)

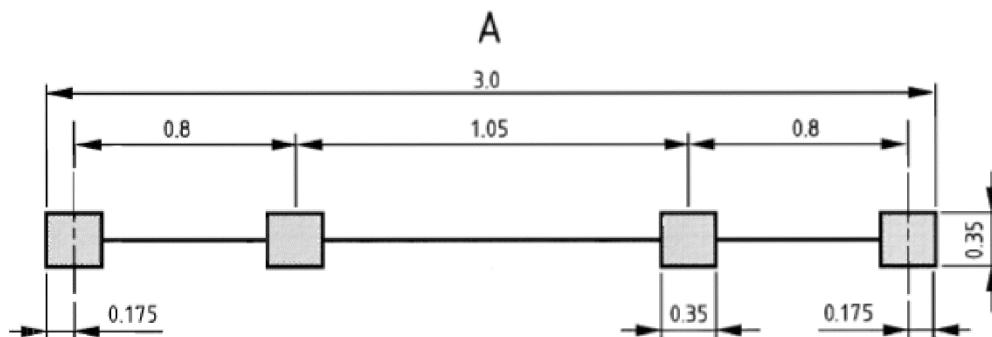


(b)



NOTE For simplicity, 6-axle trailer bogies are shown. The actual number of axles of trailer bogie should be that stated above the figure.

(c)



Key

A = Outside track and overall vehicle width, 3,0 m

Fig. 2.2 – Veículos SOV (BSI, 2003)

De forma análoga ao que acontece com os veículos, esta estratégia pode ser utilizada num âmbito mais geral com modelos de carga – esses modelos estão na maioria das vezes associados a um determinado veículo tipo.

Importa referir que, de acordo com o que foi explicado em 2.3, estas cargas não pretendem representar veículos reais, tendo sim o objetivo de corporizar um conjunto de cargas que reproduza de forma adequada os efeitos dos veículos que tenderão a circular nas estradas das regiões tuteladas por cada regulamento.

A Tabela 2.1 faz um resumo dos veículos adotados neste trabalho de entre os vários previstos em cada regulamento analisado. As razões que levaram a que não fossem considerados todos os veículos prescritos pelos regulamentos são descritas em 2.8.

Tabela 2.1 – Veículos regulamentares adotados

Regulamento (Unidades)	Veículo Tipo	Número de eixos	Distância entre eixos [m]	Número de rodas por eixo	Distância entre rodas medida "ao eixo" [m]	Carga por roda [kN]	Carga por eixo do veículo/atrelado [kN]	Carga máxima do veículo/conjunto [kN]
Regulamento Português DL235/83 – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA)	Veículo	3	1,5	2	2	100	200	600
	Load Model 1	2	1,2	2	2	150	300	600
	Load Model 2	1	–	2	2	200	400	400
Norma Europeia EN 1991-2:2003 (EC1)	Tandem	2	1,2	2	1,83	73,95	147,9	295,8
	Camião	3	1 e 2 – 4,3 2 e 3 – entre 4,3 e 9,1	2	1,83	Eixo 1 – 23,65 Eixos 2 e 3 – 94,65	Eixo 1 – 47,3 Eixos 2 e 3 – 189,3	426,5
	–	3	1,5	2	2	75	150	450
Norma Brasileira NBR7188	Sobrecargas NA(1) + NA(2)	1	–	2	1,9	72	144	144
	Sobrecarga NA(3)	1	–	2	≥1	100	200	200
	Sobrecarga NB36	4	1 e 2 – 2 2 e 3 – 6; 11; 16; 21 ou 26 3 e 4 – 2	4	1	90	360	1440
	Sobrecarga NC	Veículo de Rastros	–	–	–	–	–	(depende das dimensões)
Código Sul-Africano Code of Procedure for the Planning and Design of Highway and Road Structures	Modelo AK	2	1,5	2	1,9	53,96	107,91	215,82
	Modelo HK-80	4	1,2	2	2,7	108,9	217,8	871,2
	Load Model 1	2	1,2	2	2	180	360	720
Manual de Hong-Kong Structures Design Manual	Load Model 2	1	–	2	2	180	360	360
	Class 70R	Considerado apenas o veículo de rastros	–	–	2,06 (entre rastros)	–	–	700 (distribuído por dois rastros)
	Class A	8 (4 eixos mais 2 atrelados de 2 eixos cada)	1 e 2 – 1,1 2 e 3 – 3,2 3 e 4 – 1,2 Entre veículo e atrelado – 4,3 Entre eixos de atrelados – 3	2	1,8	Eixos 1 e 2 – 13,5 Eixos 3 e 4 – 57 Eixos de Atrelados – 68	Eixos 1 e 2 – 27 Eixos 3 e 4 – 114 Eixos de Atrelados – 68	554
Norma Indiana	Tandem	2	1,2	2	1,8	83,125	166,25	332,5
	Camião	3	1 e 2 – 4,3 2 e 3 – entre 4,3 e 9	2	1,8	Eixo 1 – 26,6 Eixos 2 e 3 – 106,4	Eixo 1 – 53,2 Eixos 2 e 3 – 212,8	478,8
Norma Colombiana NCP-14	Camião	5	1 e 2 – 3,6 2 e 3 – 1,2 3 e 4 – 6,6 4 & 5 – 6,6	2	1,8	Eixo 1 – 25 Eixos 2 e 3 – 62,5 Eixo 4 – 87,5 Eixo 5 – 75	Eixo 1 – 50 Eixos 2 e 3 – 125 Eixo 4 – 175 Eixo 5 – 150	625
Código Canadano CAN/CSA-S6-06	Camião	5	1 e 2 – 3,6 2 e 3 – 1,2 3 e 4 – 6,6 4 & 5 – 6,6	2	1,8	Eixo 1 – 25 Eixos 2 e 3 – 62,5 Eixo 4 – 87,5 Eixo 5 – 75	Eixo 1 – 50 Eixos 2 e 3 – 125 Eixo 4 – 175 Eixo 5 – 150	625

2.3.2 CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS

As cargas uniformemente distribuídas são também bastante comuns nos vários regulamentos. Servem sobretudo para representar os efeitos de filas de trânsito em situação de tráfego congestionado, sendo também utilizadas como reprodução das cargas de peões, nomeadamente a sobrecarga em passeios – que não foram abordadas neste trabalho – ou outras. A sua aplicação é algo variada conforme a regulamentação. Aos casos mais simples – como o da norma Brasileiras (Fig. 2.3 b) e do RSA – que determinam que a carga deve ser aplicada homogeneamente sobre a faixa de rodagem, opõem-se outros ligeiramente mais complexos – como o EC1-2 (Fig. 2.3 a) e o Manual de Hong Kong – que estabelecem cargas diferentes a utilizar em vias de trânsito distintas, ou outros ainda que fixam um valor único para a carga uniformemente distribuída mas que ditam que ela deve ser aplicada apenas em determinadas vias e não em toda a faixa de rodagem – é o caso dos códigos Norte-Americano (Fig. 2.3 c) e Canadano, da norma Colombiana e do regulamento Russo.

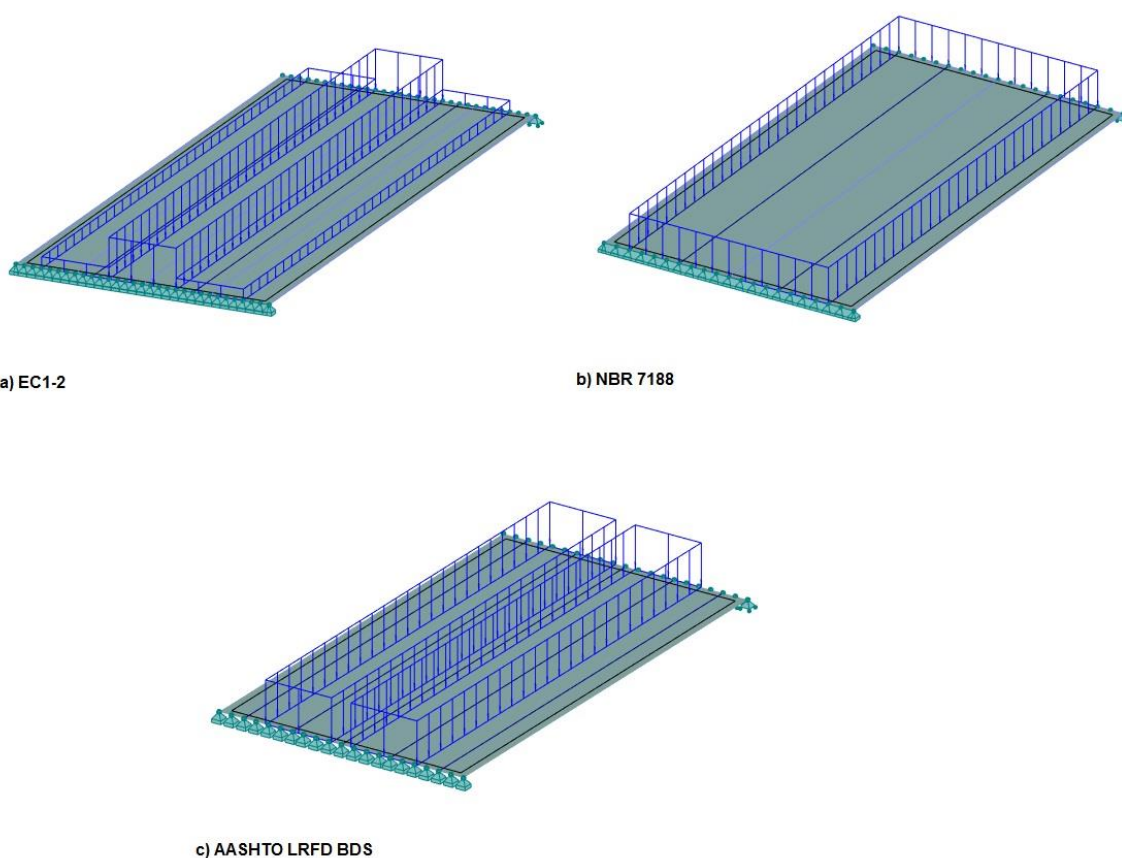


Fig. 2.3 – Exemplos de cargas uniformemente distribuídas

A norma Brasileira fixa que na área ocupada pelo veículo não deve ser aplicada carga distribuída. Pela manifesta dificuldade que se verifica na tentativa de modelar exatamente esta situação no software de cálculo, optou-se por uma simplificação. Calculou-se manualmente o valor da resultante da carga uniformemente distribuída aplicada na superfície ocupada pelo veículo e subtraiu-se esse valor ao peso bruto do veículo, distribuindo o decréscimo de peso igualmente por todas as suas rodas.

2.3.3 CARGAS LINEARMENTE DISTRIBUÍDAS

As cargas linearmente distribuídas, também designadas de cargas de faca, surgem em dois documentos, o RSA e o código Sul-Africano. No regulamento português esta carga é aplicada transversalmente à faixa de rodagem e em toda a sua largura.

Com o objetivo de simular uma fila de trânsito, o código da SATCC estipula a aplicação de duas cargas de faca longitudinais paralelas em cada via sujeita a este carregamento. No entanto, o documento prevê que, quando a distribuição transversal desta carga não seja condicionante para o funcionamento da estrutura, o carregamento pode ser substituído por um outro uniformemente distribuído com o mesmo valor de carga por metro de desenvolvimento. Uma vez que o regulamento prevê outros casos de carga com efeitos mais severos ao nível dos momentos transversais e com o objetivo de obter modelos mais simples – com consequências benignas no esforço de modelação e na eficiência de cálculo do software – foi adotada a simplificação proposta.

Este tipo de cargas foi também utilizado durante o trabalho para modelar veículos de rastros como o *Class 70R* da norma indiana.

2.4 MÚLTIPLA PRESENÇA DE VEÍCULOS

Os modelos de carga rodoviária pretendem reproduzir os efeitos do tráfego de veículos e utilizam, com esse fim, cálculo estatístico, nomeadamente para obter valores de cargas características. Estes valores têm em conta a probabilidade de ocorrência de determinados acontecimentos como seja a passagem de um veículo de determinadas características por uma obra de arte.

É mais ou menos evidente que a probabilidade de uma determinada ponte ou viaduto ter, num determinado momento, todas as suas vias carregadas por veículos pesados – cujos efeitos na estrutura são os que, por regra, os regulamentos tentam reproduzir nos seus modelos de carga – é relativamente reduzida. Assim, é de notar um esforço nos diferentes documentos por representar esta realidade de diversas formas implícitas ou explícitas.

O EC1-2 representa este fenómeno diretamente nos valores das cargas características, socorrendo-se da divisão da faixa de rodagem em vias dedicadas nas quais aplica cargas de diferente valor: a primeira via dedicada tem um carregamento mais intenso, do que as restantes, a segunda via dedicada está sujeita a um carregamento mais intenso do que a terceira, etc.

Para além desta estratégia, o Eurocódigo define fatores a serem multiplicados pela carga aplicada a cada via, cujos valores são sugeridos no texto integral do documento, mas que podem ser alterados pelo Anexo Nacional. Desta forma cada país que adere ao Eurocódigo pode adaptar as cargas rodoviárias à realidade nacional. O SDM-HK resolve este problema de forma semelhante. Este regulamento é aliás, como referido anteriormente, baseado no EC1-2 e no seu Anexo Nacional Britânico e opera muitas vezes como um Anexo Nacional do documento base.

A estratégia de aplicar fatores às cargas a empregar, em função da via de aplicação, é a mais comum, sejam estes fatores de valor fixo – caso do regulamento Norte-Americano, do código Canadano e das normas Colombiana, Indiana e Russa – ou em função de determinados parâmetros como o vão, a largura da faixa de rodagem, etc.

De forma análoga, o código Sul-Africano define uma das cargas previstas através de uma expressão que depende do número da via dedicada. O valor dessa carga é, portanto, inversamente proporcional ao número da via em que é aplicado.

Por fim existem ainda os casos do regulamento Português e das Normas Brasileiras que estabelecem a aplicação de um veículo apenas (o regulamento Português, como exposto acima, prescreve, em determinados casos, a aplicação de dois veículos) e não aplicam nenhum fator de ponderação à carga distribuída. Nos moldes em que estes estão redigidos isso nem seria possível, visto que estes documentos não propõem nenhuma divisão da faixa de rodagem em vias fictícias.

2.5 AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA

Os efeitos dinâmicos em pontes rodoviárias são originados por fatores diversos, como por exemplo as irregularidades na via, ou do próprio veículo, que provocam impactos na estrutura e as forças de inércia resultantes da passagem dos veículos com uma determinada velocidade. A carga de um veículo num ponto específico de uma ponte impõe à estrutura uma determinada deformada. Naturalmente, a circulação de um veículo a uma certa velocidade equivale a que a carga ocupe consecutivamente posições diferentes na estrutura, forçando-a a alterar a sua deformada num espaço de tempo mais ou menos reduzido. Este fenómeno provoca na estrutura acelerações e consequentemente esforços e deslocamentos diferentes dos que provocam os carregamentos estáticos, isto é, os carregamentos caracterizados por cada uma das posições do veículo isoladamente – na Fig. 2.4 são apresentadas as respostas de uma dada estrutura à circulação de um veículo considerando os efeitos dinâmicos ou não. Este é um problema dependente da velocidade do veículo, ou seja, caso o veículo circule a velocidade suficientemente reduzida, o carregamento pode ser entendido como uma série de casos estáticos de carga.

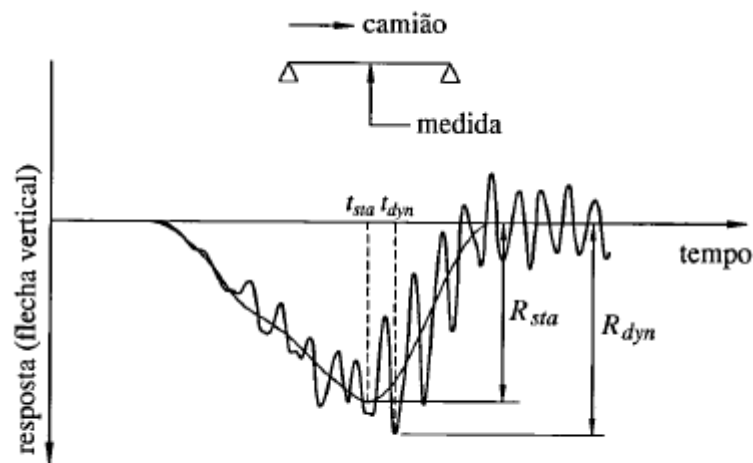


Fig. 2.4 – Respostas estática e dinâmica (Calçada, 2001)

Para ter em consideração este problema, existem duas abordagens regulamentares básicas: a de considerar implicitamente nos valores característicos das cargas este fenómeno e a de impor fatores de amplificação dinâmica a serem aplicados aos valores das cargas. Estes fatores são dados em função de parâmetros como o comprimento do vão, a proximidade a juntas de dilatação, o tipo de estrutura, etc. Os regulamentos que seguem a primeira abordagem são o EC1-2, o manual de Hong Kong, o RSA e a maioria dos modelos de carga do código Sul-Africano. Entre os regulamentos que seguem a segunda

abordagem incluem-se o código Canadano, as normas Russa, Colombiana, Indiana e Brasileira, o regulamento Norte-Americano e um dos casos de carga do código Sul-Africano.

2.6 COMPOSIÇÃO E INTENSIDADE DO TRÁFEGO E CLASSES DE PONTES

O tráfego em estradas pode ser avaliado de várias perspectivas, nomeadamente quanto à sua composição e quanto à sua intensidade. A primeira avaliação é qualitativa, ou seja, debruça-se nos tipos de veículos que circulam, definindo percentagens de ligeiros e pesados e, eventualmente, separando-os entre as distintas tipologias de cada um. Já a segunda é uma análise quantitativa, isto é, ocupa-se de mensurar o número de veículos que circula num troço de estrada num intervalo de tempo definido.

Procedendo a uma breve reflexão sobre os cenários de cada uma das regiões ou países regulamentados pelos documentos estudados neste trabalho, conclui-se facilmente que cada um destes regulamentos tem, no que a este tópico diz respeito, um campo de aplicação algo vasto. Em cada região respeitante a cada um destes regulamentos existirão presumivelmente tanto grandes pontes de autoestradas internacionais como pequenas passagens superiores ou viadutos em zonas rurais, não sendo provável que o tráfego respetivo seja semelhante, nem no que toca à sua composição nem no que toca à sua intensidade.

De forma conservativa, alguns regulamentos assumem modelos de carga ajustados a previsões de tráfego associadas a grandes obras de arte. Dessa forma, todas as pontes projetadas segundo esses modelos de carga estão aptas a suportar com segurança a circulação de tráfego pesado e intenso, ainda que não seja esse o cenário previsível para a obra de arte em questão.

Pelo contrário, e de forma a permitir a utilização de modelos de carga que deem origem a projetos mais económicos, o RSA divide as pontes a projetar em duas classes distintas: Classe I – que engloba as pontes «que servem vias de comunicação suscetíveis de terem tráfego intenso ou pesado, nomeadamente estradas nacionais, vias urbanas e certas estradas municipais e florestais» – e Classe II – onde se incluem «as pontes situadas em vias de comunicação com tráfego ligeiro e pouco intenso, que é o caso dos caminhos e passagens agrícolas e de certas estradas municipais e florestais» – impondo um modelo de carga mais severo para as pontes de Classe I (DL 235/83). O regulamento deixa assim à consideração da entidade competente em cada caso a classificação de pontes inseridas em estradas municipais ou florestais.

De forma análoga, a norma Indiana dita que as obras de arte devem ser divididas em classes de acordo com o carregamento que estão projetadas para carregar. Neste caso específico, cada carregamento – e, portanto, cada classe de ponte – corresponde a um veículo regulamentar.

Esta divisão pode também ser feita de forma implícita, como é o caso da NBR 7188 que determina que cada ponte deve ser dotada de letreiros à entrada que especifiquem, entre outras coisas, o veículo para o qual foi projetada, ficando assim discriminado o valor do peso bruto máximo de um veículo que pode, com segurança, circular nessa ponte.

Nos casos em que o regulamento propõe divisões deste género, optou-se por assumir a classe mais elevada, adotando os carregamentos mais severos.

2.7 COMBINAÇÕES DE CARGAS

Um dos aspetos que suscitou algumas dúvidas durante a execução deste trabalho foi a opção entre considerar as cargas com valores característicos ou de cálculo. Como é sabido, os valores característicos das ações são utilizados para verificações em Estado Limite de Serviço (ELS), enquanto que os valores de cálculo – ou seja, valores característicos majorados pelos coeficientes parciais de segurança associados a cada tipo de carga – se utilizam para as verificações em Estado Limite Último (ELU). A Tabela 2.2 expõe os coeficientes parciais de segurança que cada regulamento impõe para as ações permanentes e variáveis.

Tabela 2.2 – Fatores parciais de segurança para ações variáveis e permanentes de cada regulamento

Regulamento	Modelo de Carga ou Veículo Tipo	Coeficientes de Segurança para Ações Variáveis (γ_Q)	Coeficientes de Segurança para Ações Permanentes (γ_G)	Observações
Regulamento Português DL235/83 – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA)	Todos os Modelos	1,50	1,50	–
Norma Europeia EN 1991-2:2003 (EC1)	Todos os Modelos	1,50	1,35	definido na EN 1990
Regulamento Norte-Americano AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	Todos os Modelos	1,75	1,25	$\gamma_G=1,5$ para combinações em que $PP \gg SC$
Norma Brasileira NBR 7188	–	1,40	1,30	–
Código Sul-Africano Code of Procedure for the Planning and Design of Highway and Road Structures	Sobrecargas NA(1) + NA(2)	1,50	1,20 (Betão)	–
	Sobrecarga NA(3)	1,50		
	Sobrecarga NB36	1,20		
	Sobrecarga NC	1,20		
Norma Russa SNiP 2.05.03-84	Modelo AK	1,50 (veículos) 1,20 (cargas distribuídas)	1,10	–
	Modelo HK-80	1,00		
Manual de Hong-Kong Structures Design Manual	Todos os Modelos	1,35	1,35	–
Regulamento Indiano IRC:6-2014	Todos os Modelos	1,50	1,35	–
Código Colombiano CCP-14	Todos os Modelos	1,75	1,25	$\gamma_G=1,5$ para combinações em que $PP \gg SC$
Código Canadano CAN/CSA-S6-06	Todos os Modelos	1,70	1,10 (pré-fabricados)	–
			1,20 (betonados <i>in situ</i>)	

Nota:

PP – Peso Próprio Estrutural

SC – Ação Variável ou Sobrecarga

Como se pode perceber através da tabela, esta não é, de todo, uma realidade homogênea entre os vários regulamentos, o que determina que a opção de aplicar as ações com os seus valores de cálculo levará à obtenção de resultados muito diferentes dos que se alcançariam considerando valores característicos.

Na elaboração deste trabalho decidiu-se considerar as ações expressas em valores de cálculo, por se considerar que os projetos em que as verificações em ELU se assumem como condicionantes face às verificações em ELS são mais frequentes do que os casos opostos. Esta consideração é questionável. Em última análise, cada caso é um caso e qualquer generalização seria sempre falível, uma vez que os problemas de um projeto específico podem, naturalmente, não se pôr num projeto distinto. Ainda assim, e face à necessidade óbvia de eleger uma das duas opções, considerou-se que a análise em ELU seria a que conduziria aos resultados mais pertinentes para a extração de conclusões que possam servir de auxílio a projetos de obras de arte.

2.8 OUTROS ASPETOS

Antes de concluir o presente capítulo, importa referir alguns aspetos que, não se enquadrando em nenhum dos pontos anteriores, são relevantes para a análise que se apresentará posteriormente.

Em primeiro lugar, dá-se conta de que, no conjunto dos vários regulamentos analisados, estão descritos alguns modelos de carga que, por diversas razões, não foram considerados no presente trabalho. Apresenta-se de seguida uma breve descrição de modelos de carga que não foram considerados na elaboração deste trabalho e das razões que conduziram a essa opção.

No Eurocódigo 1, Parte 2, mais concretamente na *Section 4 Road Traffic Actions and Other Actions Specifically for Road Bridges*, ponto 4.3 *Vertical Loads – Characteristic Values*, são descritos 4 modelos de carga, dos quais apenas os primeiros dois foram considerados nesta dissertação. No corpo principal do documento, na descrição do *Load Model 3*, refere-se apenas que, “quando relevante, devem ser definidos e tidos em conta modelos de veículos especiais” (tradução livre do autor). Existe ainda uma nota que refere que “o Anexo Nacional pode definir o *Load Model 3* e as suas condições de uso. O Anexo A dá indicações de modelos padrão e das suas condições de aplicação” (tradução livre do autor). Uma vez que, à data da publicação desta dissertação, não existe ainda em Portugal um Anexo Nacional para este Eurocódigo e tendo em conta que o Anexo A referido descreve mais de uma dezena de veículos sem aconselhar especificamente a aplicação de um deles em detrimento dos outros, optou-se por não considerar este modelo de carga. De qualquer forma, uma vez que a norma deixa implícito que este modelo de carga não é obrigatório para todas as obras de arte, não se antevê que esta opção seja diferente da tomada num conjunto expressivo de projetos elaborados segundo este regulamento.

O quarto e último modelo de carga vertical estabelecido no Eurocódigo 1, Parte 2 (concretamente no ponto 4.4) representa um carregamento relativo a uma multidão. Também neste caso a norma refere que este carregamento deve ser aplicado apenas quando seja relevante. Por não constituir uma carga rodoviária, considerou-se que este modelo de carga se encontra algo deslocado do âmbito do trabalho e por essa razão não faria sentido considerá-lo na análise. É pretensão da presente publicação comparar os esforços causados por cargas rodoviárias em tabuleiros de pontes, não esquecendo a ação do peso próprio. Desta forma, considerar este modelo de carga seria introduzir uma carga de natureza diferente das restantes e cuja comparação seria de validade duvidável. Do mesmo modo, não foi considerada a sobrecarga nos passeios, nem os carregamentos de multidão para nenhum dos outros regulamentos.

No Manual de Hong Kong que, como referido, é baseado no EC1-2 e no respetivo Anexo Nacional Britânico, são dadas indicações mais específicas sobre o *Load Model 3* e a forma como este deve ser aplicado. Nessas indicações é referido que este modelo deverá ser aplicado em conjunto com o *Load*

Model 1, na sua combinação frequente. Ora, o *Load Model 1* define, dependendo do perfil da via, até 3 veículos a serem aplicados simultaneamente. Por razões que serão brevemente explicadas em 3.2.4, a consideração de vários veículos num tabuleiro levanta, nomeadamente para os tabuleiros de maior vão, alguns problemas relacionados com o esforço de cálculo e consequentemente com o esforço de processamento do computador onde são calculados os modelos. Por esse motivo, chegou-se à conclusão que ter em conta estes veículos exigiria um esforço adicional praticamente inabarcável que não seria compensado pelos seus eventuais proveitos.

O regulamento indiano, na descrição que faz do modelo de carga *Class 70R*, propõe várias opções quanto às características do veículo, como se pode observar na Fig. 2.5.

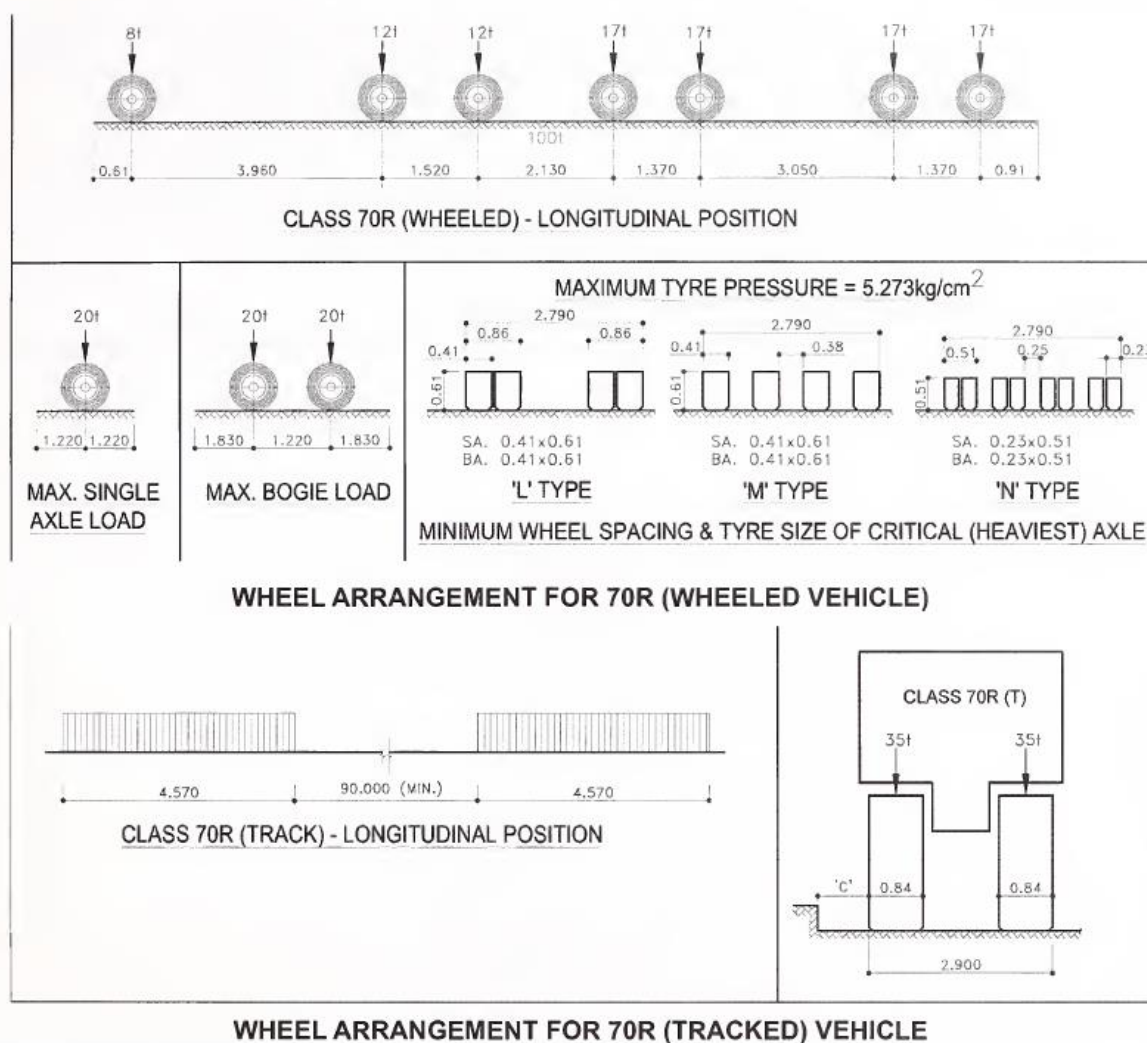


Fig. 2.5 – Características do veículo de *Class 70R* (IRC, 2014)

Devido ao número elevado de variações possíveis, não seria viável modelar todas as situações descritas, para além de que, muito provavelmente, as diferenças entre os efeitos de algumas variantes seriam pouco significativas. Dessa forma, e tal como descrito na Tabela 2.1, considerou-se para este modelo de carga apenas o veículo de rastros. Para confirmar que a adoção de disposições diferentes para este veículo não teria consequências graves modelou-se para alguns vãos dos casos de estudo o veículo de eixo único e

o *Bogie* descritos na Fig. 2.5, ambos com a disposição de rodas denominada '*M' Type* exposta na mesma imagem. A ação destes veículos não foi condicionante em nenhum desses casos.

O código canadiano, tal como descrito na Tabela 2.1, impõe a utilização de um veículo com disposição idêntica à representada na Fig. 2.6, em que os números nas rodas representam a numeração atribuída aos eixos do veículo.

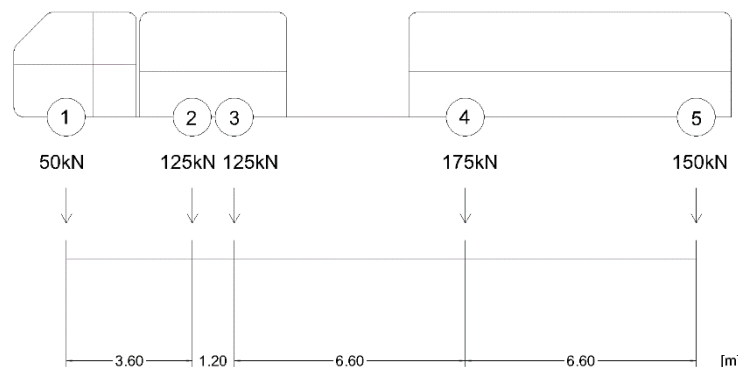


Fig. 2.6 – Esquema da disposição das cargas do veículo da CAN/CSA-S6-06

O que este código traz de novo em relação aos restantes é que refere que os eixos não têm necessariamente de ser todos aplicados simultaneamente, devendo ser utilizada a combinação de eixos que produza os efeitos mais gravosos em cada caso. Face à dificuldade que representaria a modelação de todas as combinações dos 5 eixos, decidiu-se numa primeira fase, apenas no primeiro caso de estudo e ainda sem aplicar os coeficientes parciais de segurança às ações, ou seja trabalhando ainda com cargas características, considerar as seguintes combinações:

- Veículo completo,
- Eixo 4,
- Eixos 2 e 3,
- Eixos 1, 2 e 3,
- Eixos 2, 3 e 4.

Dada a disposição e o valor das cargas previa-se que fossem estes os que pudessem ser mais condicionantes.

Analisando os resultados obtidos observou-se que algumas destas combinações não eram condicionantes no que diz respeito aos esforços avaliados (M_l , F_v e M_t) em nenhum dos vãos analisados (10m, 15m, 20m, 25m, 30m e 40m) pelo que foram postas de parte. Assim, os resultados finais, que serão posteriormente apresentados, dizem respeito às seguintes combinações de eixos:

- Veículo Completo,
- Eixo 4,
- Eixos 2, 3 e 4.

2.9 SÍNTESE DOS REGULAMENTOS

Como forma de resumo dos vários regulamentos analisados e com o objetivo adicional de complementar algum tema que, porventura, tenha sido deixado algo incompleto nos pontos anteriores, apresenta-se a Tabela 2.3 onde se condensam os aspetos com maior relevância na modelação das cargas.

Tabela 2.3 – Resumo das características mais relevantes dos modelos de carga regulamentares

Regulamento (Unidades)	Modelo de Carga	Número de Eixos	Carga Máxima por Veículo/Conjunto [kN]	Carga Uniformemente Distribuída Máxima [kN/m ²]	Carga Linear Máxima [kN/m]	Ponderação por Múltipla Presença	Amplificação Dinâmica
Regulamento Português DL235/83 – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA)	Veículo	3	600	–	–	Não	Implícita
	SUD + SLD	–	–	4	50 (transversal)		
Norma Europeia EN 1991-2:2003 (EC1)	Load Model 1	2	600	9	–	Sim	Implícita
	Load Model 2	1	400	–	–		
Regulamento Norte-Americano AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	Tandem	2	295,8	3,1 (distribuída em 3,05 m)	–	Sim	33% (incluída)
	Camião	3	426,5		–		
Normas Brasileiras NBR 7187 e NBR 7188	–	3	450	5 (aplicada em toda a área não ocupada pelo veículo)	–	Sim	Depende do vão
	Sobrecargas NA(1) + NA(2)	1	144	$36/w_l$ (para vãos até 36 m)	–		
Código Sul-Africano Code of Procedure for the Planning and Design of Highway and Road Structures	Sobrecarga NA(3)	1	200	–	–	Não	Implícita
	Sobrecarga NB36	4	1440	–	–	Veículo isolado	Implícita
	Sobrecarga NC	Veículo de Rastos	(depende das dimensões)	30 (aplicada apenas na área ocupada pelo veículo)	–	Veículo isolado	Depende do comprimento
	Modelo AK	2	215,82	$10,78/w_l$	–	Sim	Depende do vão
Norma Russa SNIP 2.05.03-84	Modelo HK-80	4	871,2	–	–	Não	Incluída
	Load Model 1	2	720	4,77	–	Sim	Implícita
Manual de Hong-Kong Structures Design Manual	Load Model 2	1	360	–	–	Veículo isolado	Implícita
	Class 70R	Veículo de Rastos	700	–	–	Sim	Depende de vários factores
Norma Indiana	Class A	8 (4 eixos mais 2 atrelados de 2 eixos)	554	5 (para larguras da faixa de rodagem inferiores a 5,3 m)	–		
	Tandem	2	332,5	3,43 (distribuída em 3 m)	–	Sim	33% (incluída)
Norma Colombiana NCP-14	Camião	3	478,8		–		
	Camião	5	625	–	–	Sim	Depende do número de eixos
Código Canadano CAN/CSA-S6-06	Camião + SUD	5	500	$9/w_l$	–	Sim	Não

Nota: w_l – Largura da via

3

DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS

3.1 INTRODUÇÃO

O conceito de modelo, por definição, remete para algum tipo de simplificação da realidade como resposta à incapacidade de representar exatamente um cenário complexo. Surge como meio para estudar um determinado fenómeno com o objetivo de retirar conclusões. De facto, os modelos utilizados para o cálculo estrutural de obras de arte podem assumir diferentes formas, com resultados algo distintos. Assim sendo, importa conceber modelos que se adequem aos que se pretende observar e que permitam uma leitura simples dos resultados.

Tendo em conta que, atualmente, a análise estrutural e a modelação que a precede é efetuada, quase exclusivamente, com recurso a software de cálculo estrutural, ganham pertinência algumas considerações associadas aos recursos informáticos. A capacidade de processamento, por não ser ilimitada, e por constituir um fator de importância capital na produtividade do cálculo estrutural auxiliado por computador, deve ser empregue da melhor forma, de modo a garantir a eficiência do modelo. Também o esforço manual de modelação deve ser, tanto quanto possível, minorado, na medida em que exige tempo de trabalho ao utilizador. Desta forma, é importante desenvolver modelos simples que não exijam esforço de cálculo computacional ou de modelação excessivo ou desnecessário. Evidentemente, a relevância deste tema cresce com a dimensão do modelo.

Os modelos utilizados neste trabalho apesar de, como será demonstrado neste capítulo, não serem especialmente complexos, repetem-se inúmeras vezes – são analisados seis vãos para o primeiro caso de estudo e cinco para o segundo, o que multiplicando pelos dez regulamentos analisados, resulta num total de cento e dez modelos no software de cálculo estrutural, não considerando o caso prático ou eventuais modelos auxiliares utilizados para validar conceitos e que não são abordados nesta dissertação. Assim, cada simplificação, ainda que poupe pouco tempo ou trabalho (na modelação, no cálculo automático ou na análise dos dados) em cada modelo, traz benefícios muito grandes no conjunto dos casos analisados. Da mesma forma, cada consideração adicional, ainda que tenha custos írisórios em cada uma das ocorrências, causa, no total, agravamentos consideráveis. Refiram-se, para terminar, os erros cometidos na fase de modelação, cuja correção se torna também muito dispendiosa, sendo tanto mais gravosa quanto o tempo que antecede a deteção da falha.

O presente capítulo pretende detalhar os modelos empregues e a forma como estes foram materializados com recurso ao software de cálculo estrutural, bem como as razões decorrentes da abordagem seguida que justificam as opções tomadas, terminando com uma breve descrição dos casos de estudo, dos quais depende, naturalmente a respetiva modelação.

3.2 MODELO ESTRUTURAL

3.2.1 ASPETOS GERAIS

Em primeiro lugar importa referir que a modelação e cálculo das várias estruturas foi feita com recurso ao software de cálculo estrutural *Autodesk Robot Structural Analysis* através de elementos finitos. As vigas foram modeladas como elementos do tipo barra, ao passo que as lajes foram modeladas como elementos do tipo casca.

No âmbito geral, foi tomada a decisão de centrar o estudo no dimensionamento de tabuleiros de pontes, descartando o dimensionamento de outros elementos estruturais como sejam pilares, arcos ou fundações. Desta opção decorrem várias outras, nomeadamente a escolha das ações a considerar, dos esforços avaliados, de aspetos relacionados com os modelos, etc. A avaliação dos esforços é feita a nível global e cinge-se aos momentos flettores positivos e esforços transversos na direção longitudinal do tabuleiro e aos momentos flettores positivos e negativos na sua direção transversal.

3.2.2 SISTEMA ESTRUTURAL LONGITUDINAL E TIPO DE APOIOS

É comum que o esquema estrutural na direção longitudinal de pontes e viadutos correntes consista em vários vãos contínuos com apoios intermédios. No entanto, a consideração de pontes com estas características neste estudo introduziria várias incógnitas no problema, como sejam a influência do comprimento de vãos contíguos nos esforços de um vão, a problemática do método e faseamento construtivo – dependendo do método escolhido, a fase de construção pode ser mais condicionante no dimensionamento de vários elementos estruturais do que a fase de exploração – etc. O estudo realizado não pretende ser uma análise detalhada de um caso específico, mas sim uma abordagem genérica que possa, com as devidas ressalvas, ser extrapolada para casos muito diversos. A consideração de vários vãos exigiria a opção por determinadas características que tornariam a estrutura demasiado singular para que essa extrapolação pudesse ser válida.

Assim, optou-se por examinar estruturas de vão único simplesmente apoiado, escolha que, ainda que constitua uma simplificação da maioria das estruturas de pontes reais, é suficientemente genérica para que a análise que se faz não perca o sentido ao abordar casos diferentes. De facto, essa abordagem pode ser interpretada como a análise de um único vão isolado dos restantes de uma dada estrutura. Assim sendo, a simplificação adotada está no tipo de apoio considerado, que depende da tipologia e geometria dos elementos estruturais adjacentes (tanto da superestrutura como da infraestrutura), entre outros parâmetros. Mais uma vez, esta simplificação é relativamente fácil de extrapolar mediante a aplicação de fatores corretivos, dependentes do tipo de apoio do vão.

A justificação do tipo de apoios prende-se com uma tentativa de uniformização dos resultados, nomeadamente dos esforços obtidos em função das ações. Este aspeto é descrito nos parágrafos seguintes.

Com o objetivo de assegurar algum controlo sobre os resultados, é desejável que a modelação seja feita de forma a prever de alguma forma os efeitos das diferentes ações na estrutura. Observe-se, a título de exemplo, o caso de um tabuleiro com duas vigas, no qual se vai proceder à análise do momento fletor longitudinal máximo na viga da esquerda, e para o qual um dado regulamento impõe que se considerem lado a lado dois veículos-tipo, de peso diferente, deixando em aberto a posição de cada um dos veículos na direção transversal da faixa de rodagem. Neste caso, os veículos-tipo devem ser posicionados de forma a atribuir, tanto quanto possível, a maior parcela de peso à viga da esquerda, o que se efetivará colocando o veículo mais pesado à esquerda do mais leve. Assim, se na fase de análise de resultados se verificar que, por efeito desta ação, os esforços na estrutura não são os que se previam *a priori*, deve ser

dedicado algum esforço adicional para averiguar as razões que levaram a este desfecho. Esta abordagem serve não só para encontrar e corrigir, *a posteriori*, erros no processo de modelação, como também para uniformizar os resultados obtidos e permitir a sua comparação.

A utilização de encastramentos, ou até de apoios duplos, em ambas as extremidades faria com que os momentos máximos na direção transversal se dessem, provavelmente, junto aos apoios para as cargas de veículos móveis, ao passo que, para cargas distribuídas, estes extremos se encontrariam próximo do centro do vão. Para resolver este problema elegeu-se uma solução de apoios que atribui a uma das extremidades um apoio com todos os deslocamentos bloqueados e todas as rotações livres e prescreve à outra um apoio que bloqueia apenas o deslocamento vertical. Esta solução coloca, em princípio, os valores máximos do momento fletor na direção transversal junto do centro do vão, tanto para as cargas veiculares como para as cargas distribuídas.

Como foi referido anteriormente, em casos reais os apoios destas estruturas podem ser muito variados, dependendo do sistema estrutural longitudinal (tabuleiro contínuo, vigas Gerber, etc.), dos aparelhos de apoio utilizados, etc. O tabuleiro simplesmente apoiado constitui a solução mais genérica ainda que possa não ser a mais comum.

3.2.3 AÇÕES CONSIDERADAS

As ações englobadas na análise são o peso próprio da estrutura e as cargas rodoviárias. Ainda que em alguns casos possam ser outras as ações condicionantes no dimensionamento de pontes e dos seus diversos elementos – como pode ser o caso da ação sísmica no dimensionamento de pilares – entendeu-se serem estas as que melhor se enquadravam no contexto do trabalho.

Como é evidente, as ações rodoviárias assumem especial relevância neste trabalho, uma vez que constituem o verdadeiro fator de distinção entre os vários regulamentos, para além da sua clara importância nos esforços de algumas estruturas e consequentemente no seu dimensionamento. A sua aplicação pode assumir formas muito variadas, tal como descrito no ponto 2.3.

Por outro lado, a consideração do peso próprio da estrutura prende-se com um dos objetivos primordiais e distintivos deste trabalho que é o de avaliar a sua importância face às ações rodoviárias e a forma como este pode atenuar os efeitos das diferenças dos efeitos das cargas rodoviárias. De facto, sendo o valor característico do peso próprio praticamente independente dos diversos regulamentos – depende sim das características dos materiais, que não variam significativamente conforme o regulamento – é previsível que a sua incorporação no conjunto das cargas atuantes aproxime os valores dos efeitos nas estruturas provocados pela aplicação das diferentes cargas regulamentares. Importa ainda realçar que este efeito atenuador é, naturalmente, dependente do vão do tabuleiro, uma vez que o peso próprio do tabuleiro dependerá diretamente deste parâmetro.

Pelo contrário, a consideração das cargas em valores de cálculo – ou seja, valores característicos majorados pelos coeficientes parciais de segurança γ_i – pode causar o efeito contrário. Uma vez que, como se viu em 2.7, estes fatores variam consideravelmente entre regulamentos, a aplicação de fatores parciais muito distintos, associada a diferenças consideráveis entre as ações variáveis (características ou de cálculo) de cada regulamento, pode provocar um agravamento das disparidades quanto aos efeitos das ações.

O volume de trabalho acrescido decorrente da consideração do peso próprio advém nomeadamente da necessidade de efetuar algum tipo de pré-dimensionamento da estrutura – ainda que neste caso, como será exposto, se tenham adotado procedimentos simplificados – pelas razões que se explicam de seguida.

Tomando como exemplo uma ponte reta, o valor do momento fletor – que é, por regra, o esforço mais relevante para este tipo de pontes – é dado pela expressão:

$$M = K \cdot P \cdot L^2 \quad (1)$$

em que K é uma constante que depende do ponto em questão do tabuleiro, do tipo de apoios, etc., P é a carga atuante e L o comprimento do vão, que assume maior importância que os restantes fatores, uma vez que vem ao quadrado.

À medida que aumenta o vão da ponte cresce também o momento atuante e consequentemente a quantidade de material necessário para lhe resistir, ou seja, o peso próprio – que pode ser entendido como o reflexo no carregamento da capacidade resistente da secção. De facto, se é algo evidente que um acréscimo do peso próprio provoca o crescimento do momento solicitante, não é menos verdade o contrário, ou seja, um aumento do momento solicitante, em princípio, acarreta também indiretamente um incremento no peso próprio, devido à necessidade de utilizar mais material para lhe resistir (Manterola, 2006). Desta forma, a curva que relaciona o peso próprio do tabuleiro com o comprimento do vão é uma progressão de crescimento geométrico semelhante às representadas na Fig. 3.1.

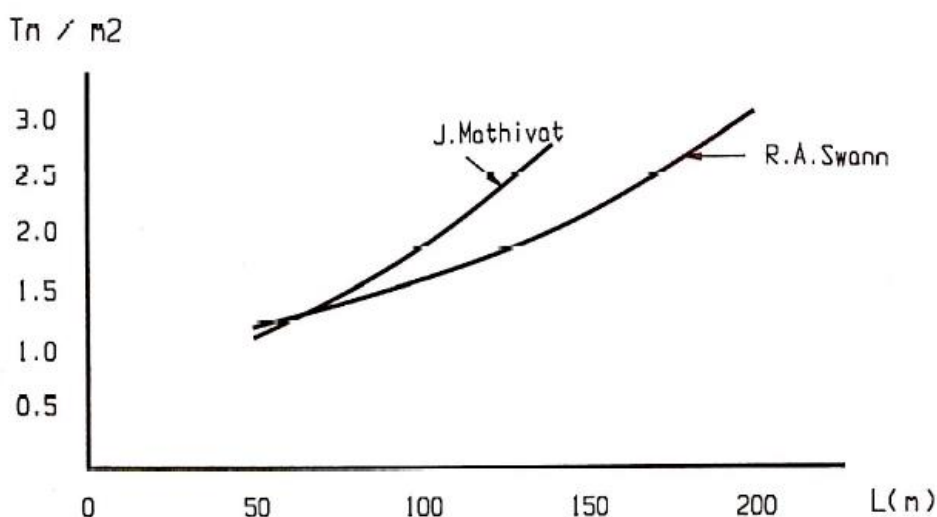


Fig. 3.1 – Peso próprio em função do vão (Manterola, 2006)

Para resolver a problemática exposta e outras associadas, torna-se necessário recorrer a algum método de pré-dimensionamento que providencie uma altura de secção transversal em função das características da obra de arte (tipologia, comprimento do vão, material resistente, etc.). Estes métodos de pré-dimensionamento são tanto mais complexos quanta a importância da estrutura, uma vez que o trabalho prévio evita complicações posteriores cujos custos e inconvenientes são também proporcionais ao valor da obra.

Neste caso, o que se pretende não é tanto obter na fase de pré-dimensionamento valores otimizados, mas sim tomar dimensões da secção transversal que originem valores razoáveis do peso próprio, adequados ao tipo de estrutura, ao comprimento do vão e às suas restantes características. Também a forma da secção transversal – que detém um papel central no dimensionamento por ser determinante para a inércia da secção e consequentemente para a sua rigidez – não toma grande relevância na análise em causa, uma

vez que esta se foca nos esforços em estruturas longitudinalmente isostáticas, ignorando o estudo das correspondentes deformações. Em última análise, não seria necessário mais do que um valor de uma carga distribuída por metro quadrado a aplicar à estrutura que representasse adequadamente a ação peso próprio.

Por se ter utilizado software de cálculo estrutural que, por regra, calcula e aplica automaticamente a ação peso próprio em função das características da estrutura (material, forma, etc.), optou-se por conciliar duas abordagens para obtenção do peso próprio. Numa primeira fase, com base na experiência da empresa onde foi desenvolvida a dissertação, definiram-se valores indicativos da altura da secção em função do vão para cada tipo de ponte. Com o objetivo de validar essas estimativas, decidiu-se consultar bibliografia de referência – (Manterola, 2006), (Magalhães, 2013), (Reis, 2006) – que corroborou as hipóteses admitidas. Os valores obtidos deste processo serão descritos posteriormente nos pontos 3.3 e 3.4.

3.2.4 CARGAS MÓVEIS

A modelação das cargas móveis, apesar de não manifestar especial complexidade, é de natureza algo distinta da generalidade das ações, nomeadamente das tratadas nesta dissertação. Por esta razão, por depender em grande parte do software de cálculo estrutural utilizado e por se considerar que constitui uma tarefa fora do expediente comum de uma parte significativa dos agentes que atuam no universo da Engenharia Civil e de Estruturas, decidiu-se resumir neste ponto a forma como se desenvolve este processo.

Tal como foi descrito em 2.5, os efeitos dinâmicos da circulação de veículos em obras de arte podem ter importância considerável nos esforços das estruturas. Ainda assim – e, mais uma vez, de acordo com o exposto em 2.5 – qualquer análise dinâmica que extravase as descritas nesse ponto encontra-se manifestamente fora do âmbito desta tese. De facto, ainda que a designação “Carga Móvel” possa sugerir a associação a análises dinâmicas, não é disso que se trata.

O *Robot Structural Analysis* trata as cargas móveis como uma sucessão de casos estáticos de carga. A sua utilidade reside no facto de abordarem, num só modelo de carga – e, portanto, numa só tarefa de modelação – um número tão grande quanto desejado de casos de carga. Cada caso de carga corresponde a uma posição do veículo na faixa de rodagem. Desta forma, é possível saber qual a posição do veículo que provoca esforços mais condicionantes na estrutura e, naturalmente, o valor desses esforços.

Em primeiro lugar é necessário definir o veículo que atua na estrutura, que é composto por um conjunto de cargas. Cada carga é definida pela sua natureza (carga concentrada, carga linear ou carga uniformemente distribuída), pela sua intensidade e pela sua localização em relação a um referencial relativo. Posteriormente são definidos pelo utilizador, entre outros parâmetros, a linha percorrida pelo veículo – que em geral corresponde a um segmento de reta complanar com a faixa de rodagem e paralelo ao seu eixo limitado pelas extremidades apoiadas do tabuleiro – e o *step* que pode ser traduzido por passo ou degrau e corresponde à distância entre posições sucessivas do veículo. Um valor reduzido do *step* implica um nível de detalhe maior e, consequentemente, um esforço de cálculo superior e um

número de combinações mais elevado. A Fig. 3.2 apresenta, a título de exemplo, duas janelas de modelação de cargas móveis apresentadas no *Robot Structural Analysis*.

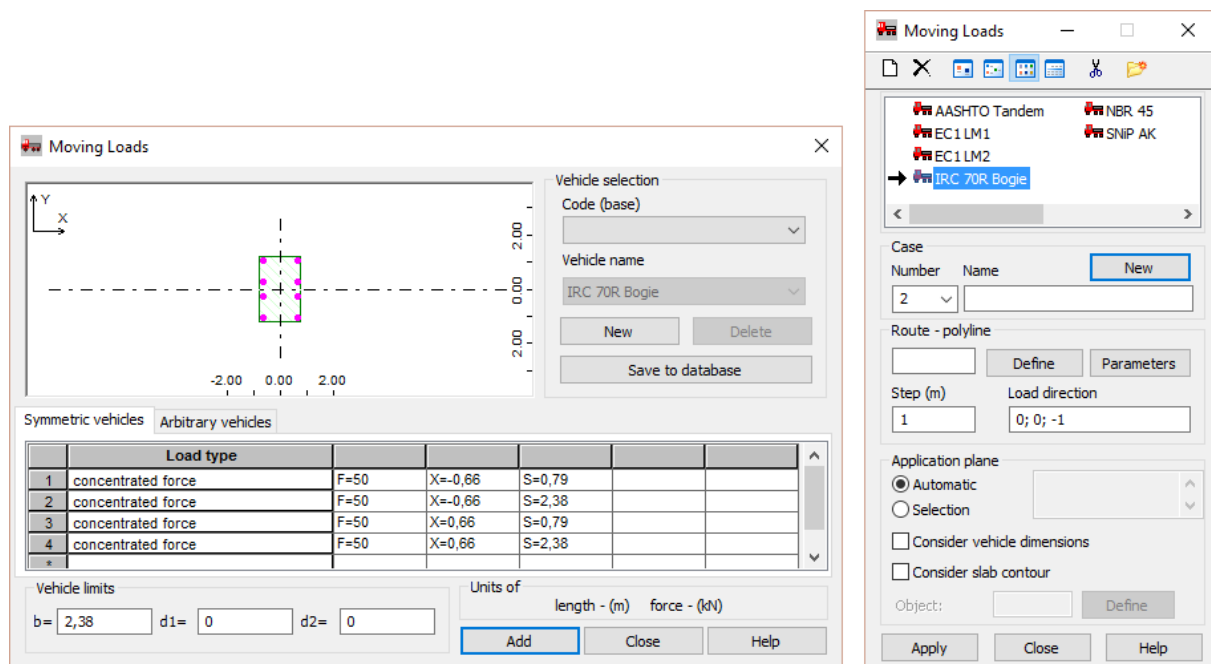


Fig. 3.2 – Janelas de modelação de cargas móveis – *Robot Structural Analysis*

Definidos todos estes parâmetros, o software calcula, para cada uma das posições do veículo, os esforços na estrutura. Após o cálculo de um modelo que inclua cargas deste tipo, é possível visualizar os esforços para cada uma das posições do veículo ou as envolventes respeitantes ao conjunto das sucessivas posições.

As cargas móveis, apesar de todas as vantagens que acarretam, que as tornaram essenciais neste trabalho, apresentam também alguns inconvenientes. O primeiro prende-se com o esforço de cálculo que exigem, decorrente do número de combinações que as caracteriza. Observe-se o exemplo de uma estrutura com um vão de 20m na qual se aplicam duas cargas móveis caracterizadas por veículos genéricos que percorrem todo o vão sobre linhas paralelas ao eixo da faixa de rodagem (cada veículo percorre uma das linhas) com um *step* de 1m. A cada um destes modelos de carga estão associados 21 casos estáticos de carga – sendo *x* a posição do veículo na linha que percorre, calculam-se os casos referentes a $x=0m$, $x=1m$, $x=2m$, ..., $x=20m$. Em consequência, combinando os dois veículos e cada uma das suas sucessivas posições obtêm-se 21^2 , ou seja, 441 combinações, isto porque para cada uma das 21 posições do primeiro veículo é preciso analisar 21 posições do segundo. Recorrendo a cálculo combinatório simples, é possível prever as consequências deste problema. Ainda assim, sem qualquer cálculo, e observando apenas o exposto neste parágrafo, não é difícil perceber que, para vãos relativamente grandes, nos quais se pretenda combinar a ação conjunta de um número de veículos que não tem, necessariamente, de ser elevado, em todas as posições que cada um deles pode ocupar, facilmente se atingem as centenas de milhares de combinações.

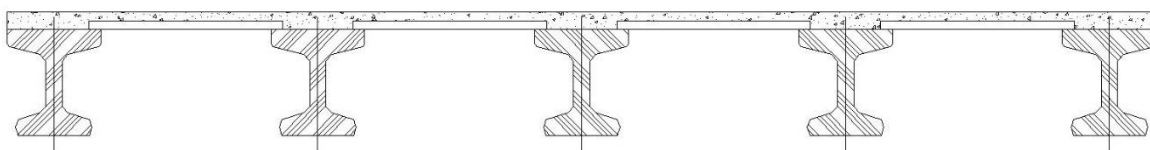
Outro problema provocado pela utilização destas cargas é a dificuldade acrescida na conceção de malhas de elementos finitos. A aplicação destas cargas pelo software, como foi explicado acima, processa-se pela repetição de múltiplos casos de carga – caracterizados por várias cargas, concentradas ou não, com pontos de aplicação diferentes – em posições consecutivas. O número de pontos de aplicação de cargas

associados ao percurso de um determinado veículo é dado pelo produto do número de pontos de aplicação de cargas de cada veículo pelo número de posições ocupadas pelo veículo ao longo do percurso. Por exemplo, no caso de um veículo de 4 rodas que ocupe 20 posições diferentes – pode ser o exemplo de um percurso de 19 metros com um *step* de 1m – o número total de pontos de aplicação de cargas é igual a $4 \times 20 = 80$. A malha de elementos finitos – que o software gera automaticamente, mediante a introdução de determinados parâmetros – tem que cobrir todos estes pontos, tarefa que, por vezes, só é possível completar utilizando malhas muito refinadas ou muito irregulares, com as respetivas consequências no cálculo do modelo e no esforço de processamento que este exige. Este problema agudiza-se quando os pontos de aplicação das cargas seguem linhas muito variadas, como acontece quando se utiliza mais do que um veículo de geometria em planta distinta ou mais do que um segmento de reta para o percurso de veículos. Na generalidade dos casos modelados dão-se em simultâneo os dois cenários: existe mais do que uma carga móvel e mais do que um percurso. Torna-se assim difícil de obter malhas regulares que não sejam excessivamente delgadas.

3.2.5 POSIÇÃO RELATIVA DAS SECÇÕES

A secção transversal do tabuleiro vigado, que será descrita mais detalhadamente adiante (ver 3.3), é constituída por dois elementos estruturais distintos: as vigas longitudinais e a laje. A posição relativa dos dois elementos tem consequências claras no valor da rigidez da secção transversal do tabuleiro. Como é evidente, uma secção transversal em que os eixos das vigas se encontram no plano médio da laje, além de constituir uma abstração da realidade, tem muito menor inércia – e consequentemente menor rigidez – do que uma secção em que a laje está afastada dos eixos das vigas. Por outro lado, na generalidade dos casos concretos de pontes de vigas pré-fabricadas em forma de *I*, a laje encontra-se sobreposta às vigas (Fig. 3.3 a) ou alinhada com os seus banzos superiores (Fig. 3.3 b) (Manterola, 2006) sendo a primeira solução largamente utilizada por motivos de simplicidade construtiva. Uma das técnicas para construir pontes com laje sobre as vigas é a utilização de pré-lajes apoiadas nas vigas (Fig. 3.3 a), que servem como elemento resistente e simultaneamente de cofragem perdida, com clara vantagem no tempo e custo da obra. De facto, o caso de estudo que agora se descreve encontra-se claramente nesta categoria de tabuleiros com laje sobreposta às vigas e utilização de pré-laje, o que tem consequências ao nível da rigidez da secção.

a) Laje sobreposta às vigas



b) Laje alinhada com os banzos superiores

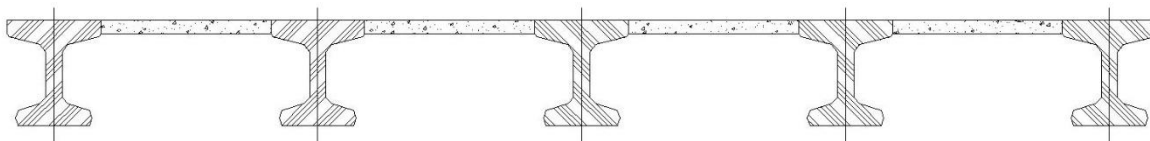


Fig. 3.3 – Posição da laje em relação às vigas

Uma das possíveis soluções para a modelação desta situação seria a de considerar um deslocamento relativo das vigas em relação à laje, nomeadamente através da introdução no software de cálculo de um *offset* pelo banzo superior. A utilização desta opção traduz-se no modelo de cálculo automático por um deslocamento da viga no sentido descendente, acompanhado de uma compatibilização das deformações de cada um dos pontos das diversas vigas com os pontos correspondentes da laje. Essa compatibilização introduz esforços axiais de sinal oposto na laje e nas vigas. O binário formado por essas forças, é equilibrado por um momento interno adicional. Esse momento interno não é efeito direto das ações, mas sim da compatibilização das deformações, essas sim efeito direto das ações. Por esse motivo, o momento que se lê nas vigas e na laje não é o momento diretamente provocado pelas ações, mas sim a soma deste com o momento interno decorrente da compatibilização das deformações. Para obter os momentos provocados pelas ações é necessário calcular o momento interno que resulta da compatibilização de deformações e descontá-lo ao momento total, o que constitui uma tarefa demasiado trabalhosa na generalidade dos casos correntes de engenharia.

Para contornar este problema, é comum recorrer a uma estratégia que consiste na modelação das vigas e da laje num mesmo plano, introduzindo fatores de amplificação da rigidez das vigas. Esta abordagem soluciona o problema da consideração da rigidez total da secção sem impossibilitar a leitura direta dos esforços.

No entanto, no presente trabalho analisam-se apenas os efeitos das ações ao nível dos esforços na estrutura, desprezando as suas deformações. Paralelamente, é sabido que a rigidez da secção transversal assume especial preponderância nas deformações da estrutura, tendo, porém, pouco efeito nos esforços de uma estrutura isostática na direção longitudinal. Por estes motivos, optou-se por não considerar nenhum deslocamento relativo das vigas em relação à laje, nem nenhuma amplificação da rigidez da secção, modelando simplesmente os eixos das vigas no plano médio da laje.

3.3 1º CASO DE ESTUDO – TABULEIRO DE VIGAS PRÉ-FABRICADAS

Os tabuleiros vigados são uma solução corrente na engenharia de pontes que pode ter utilizações muito diversificadas. Assumem-se sobretudo como solução vantajosa no caso de pontes retas para cujo vão os tabuleiros em laje se tornam demasiado pesados. Esta tipologia de superestrutura é fundamentalmente constituída por três tipos de elementos: vigas principais ou longitudinais, travessas ou carlingas (dispensáveis em determinadas situações) e laje. Os elementos de maior importância, porque têm a função de vencer o vão, são as vigas principais, que recebem a sobrecarga transmitida pela laje. As carlingas fazem a ligação entre as vigas longitudinais, contribuindo para a redistribuição transversal das cargas e dos esforços, podendo também servir de apoio à laje (Reis, 2006).

Nos modelos efetuados não foram colocadas carlingas em nenhuma secção do vão nem nos apoios. Esta simplificação, como outras já mencionadas, decorre da procura pela simplicidade dos modelos e de uma solução generalizada. A utilização destes elementos introduziria no modelo mais um conjunto de variáveis (número e dimensões das carlingas, disposição no tabuleiro, posição relativa face à laje e às vigas principais, etc.) que, para além de exigir um acréscimo do volume de trabalho aumentaria a especificidade do caso de estudo, diminuindo a legitimidade da generalização das conclusões.

Uma das divisões que é possível estabelecer para este tipo de pontes é entre os tabuleiros de vigas pré-fabricadas (como é o caso) e os tabuleiros vigados betonados *in situ*. O recurso à pré-fabricação, para além de poupar trabalho em obra – uma parte importante da atividade é transferida para montante do processo – com as vantagens que daí possam advir (melhorias no controlo de qualidade, diminuição de custos associada à produção em massa, etc.), faz por aproveitar da melhor forma o material, tirar maior

partido das vantagens inerentes a este tipo de pontes e mitigar os inconvenientes que lhe estão associados. Para isso, recorre à utilização de formas mais elaboradas, difíceis de alcançar em peças betonadas *in situ*.

As vigas pré-fabricadas são, por regra, pré-esforçadas por pré-tensão. O tema do pré-esforço não será abordado nesta publicação, por se considerar que se trata de um problema a jusante no processo de dimensionamento de pontes e que se afasta do contexto do trabalho.

O primeiro caso de estudo consiste, precisamente, num tabuleiro de vigas pré-fabricadas espaçadas de 2,25m, acopladas a uma laje com 20cm de espessura – Fig. 3.4. A faixa de rodagem está projetada para conter uma via de circulação afeta a cada sentido, sem separação física, seguida de uma berma de cada lado e um passeio em cada extremidade. A largura de cada via, de cada berma e de cada passeio, incluindo o guarda-corpos e a viga de bordadura, é de 3,5m, 1m e 1,15m, respetivamente, fixando a largura total do tabuleiro em 11,30m.

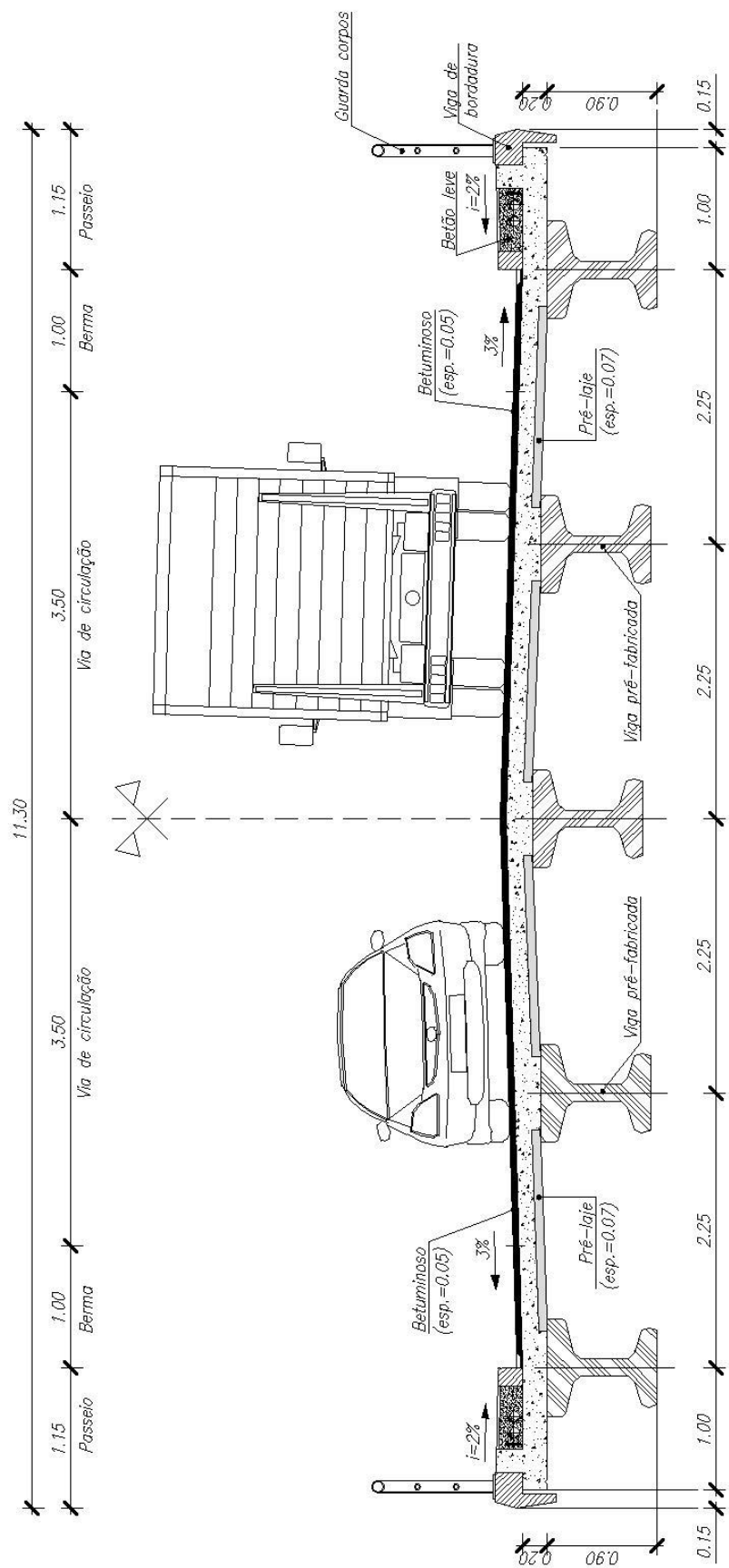


Fig. 3.4 – Seção transversal e perfil da via do tabuleiro de vigas pré-fabricadas

Com o propósito de atribuir dimensões às vigas que, naturalmente, variam com o comprimento do vão (ver 3.2.3), tomou-se uma relação de h/L (altura da secção por comprimento do vão) de $1/20$ e escolheu-se, de entre um rol de vigas pré-fabricadas com secções de formas idêntica à da Fig. 3.5, vigas com alturas próximas desse valor. As dimensões das vigas constam da Tabela 3.1.

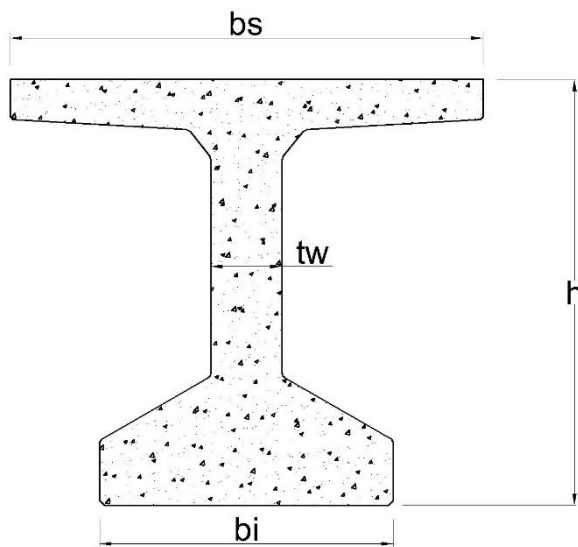


Fig. 3.5 – Exemplo de viga pré-fabricada

Tabela 3.1 – Dimensões das Vigas Pré-fabricadas

Comprimento do vão – L	$L/20$	Altura da Viga – h	Altura Total da Secção	Largura do Banzo Superior - b_s	Largura do Banzo Inferior - b_i	Espessura da Alma - t_w
[m]		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
10	0,50	0,60	0,80	0,40	0,35	0,20
15	0,75	0,70	0,90	0,80	0,62	0,14
20	1,00	0,90	1,10	1,00	0,62	0,15
25	1,25	1,10	1,30	1,20	0,62	0,16
30	1,50	1,50	1,70	1,20	0,62	0,18
40	2,00	2,00	2,20	1,40	0,62	0,18

Na modelação destes tabuleiros foram admitidas várias simplificações com grau de importância diferente. A primeira foi a de não considerar o peso de vários elementos (pavimento betuminoso, betão leve no passeio, viga de bordadura e guarda corpos) que usualmente se incluíam no grupo das Restantes Cargas Permanentes. Esta resolução insere-se no conjunto das decisões sobre as ações consideradas, tema abordado no ponto 3.2.3. Também não foi feita nenhuma distinção entre as pré-lajes e a laje propriamente dita, tendo sido modelado o conjunto como uma laje de 20cm. Sendo ambos de betão, o peso próprio destes elementos não deverá ser muito diferente, pelo que, no que às ações diz respeito,

esta simplificação não deve ser significativa. Também as inclinações dos pavimentos foram desprezadas. A simplificação mais significativa terá sido, porventura, a que diz respeito à posição relativa da laje quanto às vigas, descrita no ponto 3.2.5.

As várias estruturas foram modeladas, como referido no ponto 3.2.1, com recurso ao software de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis* utilizando, para a modelação das vigas, elementos barra e, para a modelação das lajes, elementos casca. A Fig. 3.6 apresenta um exemplo de um modelo de elementos finitos concebido para uma estrutura deste tipo. São observáveis as vigas principais e a laje – com o eixo à mesma cota (ver 3.2.5) – bem como a malha de elementos finitos e os apoios – simples na extremidade oculta na imagem e com os deslocamentos todos impedidos na extremidade visível (ver 3.2.2). Como referido anteriormente neste ponto, o modelo não incorpora carlingas no vão nem nos apoios.

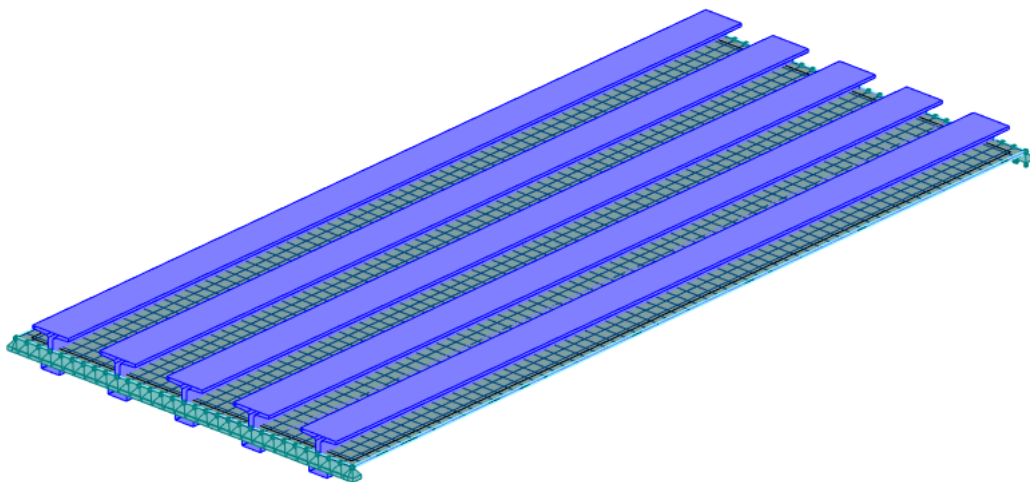


Fig. 3.6 – Exemplo de um modelo de tabuleiro de vigas pré-fabricadas – *Robot Structural Analysis*

3.4 2º CASO DE ESTUDO – TABULEIRO EM LAJE NERVURADA

Os tabuleiros em laje, cuja morfologia pode variar muito, tanto a nível longitudinal como transversal, são uma solução muito comum para pontes e viadutos de pequeno a médio vão. São resultado de um compromisso entre a facilidade construtiva e a capacidade resistente – (Manterola, 2006). Por terem uma morfologia tão variável, têm a vantagem de se adaptarem facilmente a casos muito distintos.

Ainda que existam também tabuleiros em laje contruídos com grande integração de elementos pré-fabricados – nesse caso a construção processa-se, regra geral, com recurso a aduelas aligeiradas pré-fabricadas montadas por avanços sucessivos em consola ou apoiadas em cimbrês, (Manterola, 2006) – é mais comum que as pontes deste género sejam betonadas *in situ*. Tal como exposto previamente, na conceção de elementos pré-fabricados é conveniente adotar formas e processo repetitivos, ao mesmo tempo que não se coloca, com tanta premência, o problema da complexidade geométrica. Pelo contrário, na conceção de estruturas betonadas *in situ*, a principal preocupação está na simplificação geométrica das configurações a adotar, ao passo que a repetição de formas não traz benefícios tão expressivos. De facto, se é verdade que a utilização de tabuleiros betonados *in situ* dificulta a otimização das secções transversais, é igualmente válido dizer que facilita a variação da forma. Com efeito, se não é fácil

construir pontes curvas com recurso a vigas pré-fabricadas, a construção de tabuleiros com essa configuração em planta não assume especial dificuldade quando realizada *in situ*. Mesmo a utilização de tabuleiros de altura de secção variável se torna, geralmente, menos vantajosa economicamente quando alcançada através da utilização de elementos pré-fabricados.

Por estes motivos, estas pontes são geralmente a solução mais competitiva quando o projeto requer configurações mais singulares, nomeadamente para pontes em curva, não deixando de ser comuns em outras situações, por exemplo em passagens superiores retas.

A gama de vãos para a qual esta solução é competitiva vai sensivelmente até aos 30m, motivo que conduziu à opção de não considerar vãos de 40m, como aconteceu para os tabuleiros vigados. Ainda que esta tipologia possa ser adotada para vãos até aos 50m ou 60m, para vãos deste comprimento é necessário incorporar grandes quantidades de pré-esforço, aumentando o grau de complexidade do projeto e da execução da obra, o que acarreta também um aumento dos custos. Tal como foi referido anteriormente, o tema do pré-esforço não será tratado nesta dissertação. Ainda assim, é importante referir que as pontes desta tipologia utilizam recorrentemente bainhas de pré-esforço com cabos sujeitos a pós-tensão, assumindo este tema grande relevância, sobretudo para vãos de maior dimensão.

Uma das desvantagens desta tipologia de pontes está nos valores do peso próprio que normalmente lhe estão associados. Para contrariar este fator recorre-se com frequência ao aligeiramento das secções transversais, sendo esta prática recorrente para vencer vãos a partir dos 20m. O aligeiramento no interior das secções ocorre normalmente com formas circulares ou retangulares, tal como representado na Fig. 3.7 (Reis, 2006). Os valores aí apontados são indicativos. O aligeiramento com formas retangulares acarreta alguns inconvenientes, nomeadamente na altura da betonagem, uma vez que este formato é propício a que se criem vazios na lâmina inferior. Os aligeiramentos mais comuns são realizados com recurso a cofragem perdida de forma circular, utilizando para o efeito tubos de PVC ou de outros

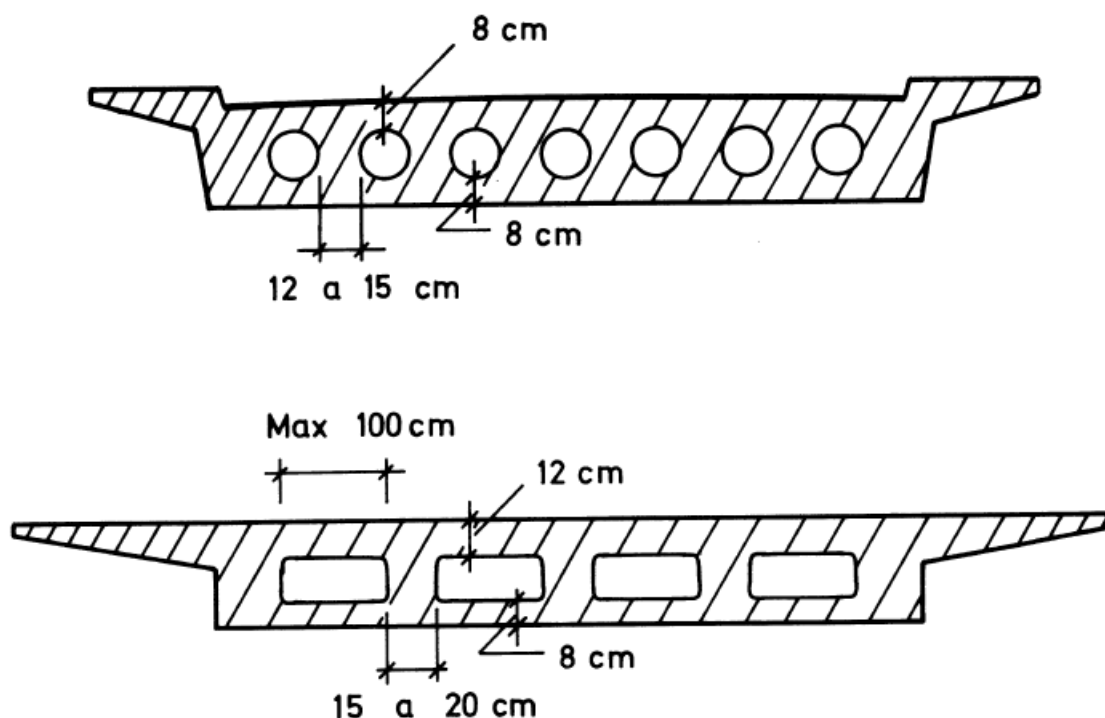


Fig. 3.7 – Aligeiramento de secções transversais de tabuleiros em laje (Reis, 2006)

materiais. Importa, por fim, referir que o aligeiramento das secções não se executa ao longo de todo o vão, utilizando-se maciçamentos junto dos apoios. (Reis, 2006)

Tal como foi exposto em 3.2.3, os valores a adotar para o peso próprio dos elementos das estruturas modeladas foi alvo de alguma reflexão prévia. Tal como para o caso do tabuleiro vigado, foi executado um pré-dimensionamento simplificado, assumindo valores de h/L iguais aos do primeiro caso de estudo – sendo neste caso h a altura da nervura. Neste segundo caso, acresce o problema da necessidade de considerar o aligeiramento.

Se, como foi referido, o mais importante neste trabalho era obter um valor para a ação peso próprio, independentemente da inércia das secções, também para a consideração do aligeiramento, a forma como este é feito não assume tanta relevância como os valores finais da área aligeirada. Com o fim de obter esses valores finais de percentagens de aligeiramento estudaram-se dois casos de obras de arte projetadas pela CCAD, extrapolando para os modelos do trabalho os valores de aligeiramento aí utilizados. Assim, modelaram-se os tabuleiros com vão igual ou superior a 20m com um aligeiramento de 20% na nervura – os tabuleiros de 10m e 15m foram modelados como sendo intergalmente maciços – valor que tem em consideração tanto o aligeiramento na direção transversal como longitudinal. Esta consideração foi materializada nos modelos por meio de uma alteração das características dos materiais, diminuindo o peso volúmico em 20%.

A utilização de nervuras, solução vastamente aplicada, surge também como uma forma de retirar material à secção diminuindo, conseqüentemente, o seu peso próprio. As secções com esta configuração são então constituídas por uma ou mais nervuras centrais que constituem os principais elementos resistentes, por duas consolas laterais que têm a função de transmitir as cargas às nervuras e, eventualmente, por lajes de espessura reduzida entre as nervuras.

As secções modeladas são deste tipo, possuindo uma única nervura central. Para tornar este formato presente nos modelos utilizaram-se três lajes. As duas lajes laterais, que representam as consolas, têm espessura variável, crescente no sentido do exterior até à nervura. A laje central foi modelada com espessura igual à prevista no pré-dimensionamento ($L/20$) e sendo constituída por um material em tudo semelhante ao das consolas, exceto no peso volúmico, que é 20% mais leve.

Como se pode observar na Fig. 3.8, o perfil da via é em tudo semelhante ao considerado no primeiro caso de estudo. Este facto não é casual, e tem o propósito de reforçar a legitimidade da comparação dos resultados dos dois casos de estudo. A descrição da via pode ser consultada em 3.3.

As simplificações são semelhantes às adotadas no caso de estudo anterior, nomeadamente ao não considerar as Restantes Cargas Permanentes e ao desprezar a inclinação dos pavimentos. Também a posição relativa entre a nervura e as consolas constitui uma simplificação na medida em que os modelos assumem que o eixo de cada um destes elementos se encontra à mesma cota, quando na realidade são as faces superiores destes elementos que se encontram alinhadas. As implicações desta situação estão descritas em 3.2.5, ainda que neste caso se preveja que a sua relevância seja menor, uma vez que, como foi referido anteriormente, o principal elemento resistente é a nervura.

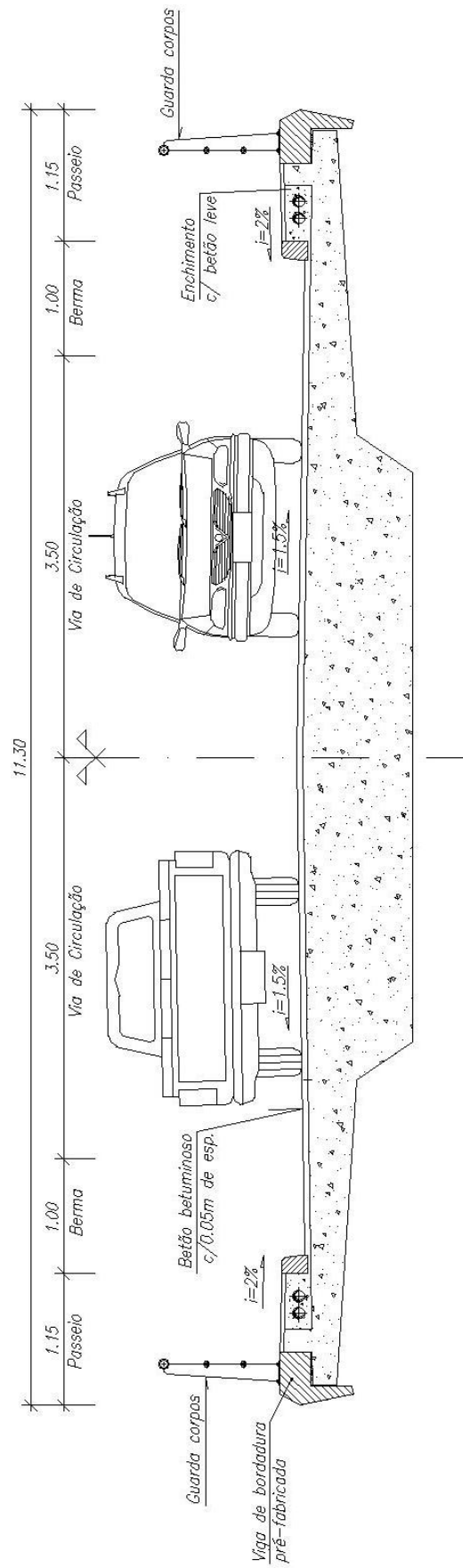


Fig. 3.8 – Seção transversal e perfil da via do tabuleiro em laje nervurada

O formato das secções modeladas é idêntico ao da Fig. 3.9 e as suas dimensões estão descritas em função do comprimento do vão na Tabela 3.2.

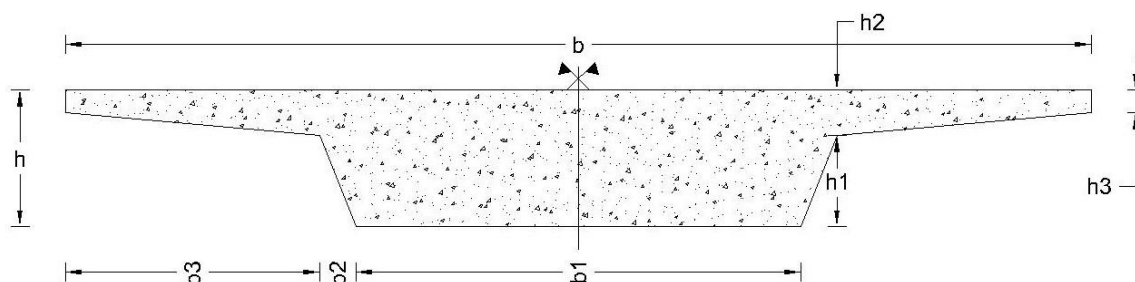


Fig. 3.9 – Secção-tipo do tabuleiro em laje nervurada

A largura total do tabuleiro, b , é de 11,30m, independentemente do comprimento do vão, assim como a dimensão b_2 que, por simplificação, foi tida como nula em todas as situações.

Tabela 3.2 – Dimensões das secções dos tabuleiros em laje

Comprimento do vão – L	h	h_1	h_2	b_1	b_3
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
10	0,50	0,15	0,30	6,70	2,30
15	0,75	0,15	0,35	6,30	2,50
20	1,00	0,20	0,40	5,90	2,70
25	1,25	0,20	0,45	5,70	2,80
30	1,50	0,25	0,50	5,00	3,00

Tal como no caso de estudo anterior, as várias estruturas foram modeladas através do software de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis*. Uma vez que nestes modelos não existem vigas, não foram, neste caso, utilizados elementos barra. Todas as lajes foram modeladas como elemento do tipo casca. A Fig. 3.10 representa um modelo de um tabuleiro em laje nervurada retirado do software *Robot Structural Analysis*.

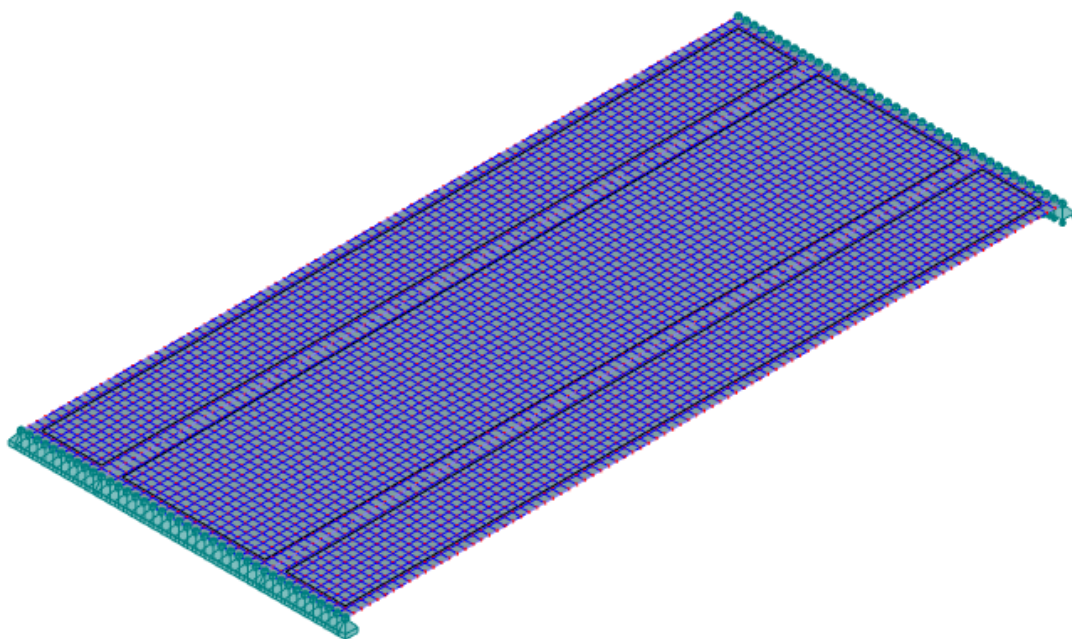


Fig. 3.10 – Exemplo de um modelo de tabuleiro em laje vigada – *Robot Structural Analysis*

Observando a figura é possível distinguir as três lajes – que, tal como referido, correspondem à nervura central e às duas consolas – a malha de elementos finitos e os apoios idênticos aos do caso de estudo anterior.

4

ESTUDO COMPARATIVO

4.1 INTRODUÇÃO

O estudo comparativo dos efeitos das ações rodoviárias nas estruturas em função do comprimento do vão e dos regulamentos aplicados e respetivos modelos de carga constitui o objetivo principal do presente trabalho. Assim sendo, torna-se importante desenvolver processos de análise de dados mais ou menos normalizados, sob pena de que as disparidades na forma de analisar os resultados se possam traduzir na obtenção de resultados de difícil comparação. A automatização de procedimentos assume também especial interesse na medida em que o sucesso deste propósito influencia decisivamente a eficiência da análise de dados tanto a nível de tempo consumido como de esforço de processamento.

Um outro fator fundamental para a utilidade deste trabalho é a eficácia da forma de apresentação de resultados. Por este motivo, tentou-se simplificar a exposição dos resultados utilizando tanto tabelas como gráficos e evitando a redundância na exibição dos dados sob pena de tornar este ponto demasiado denso, complicando a compreensão da informação por parte do leitor. Assim, ao longo do capítulo será omitida informação considerada secundária, exibindo apenas os resultados que se consideraram mais relevantes ou aqueles dos quais é possível extrair conclusões mais pertinentes.

Neste capítulo é primeiramente descrita a forma como se concretizou a análise dos resultados e as diferenças entre os processos adotados para os dois casos de estudo decorrentes das características inerentes a cada um. Posteriormente são apresentados os resultados para cada um dos casos de estudo, dispondo a informação por diferentes níveis de desagregação. Primariamente é feita uma divisão em função do comprimento dos vãos, seguindo-se a discriminação entre a análise longitudinal e a análise na direção transversal. Como referido anteriormente, na direção longitudinal são apresentados os resultados do momento fletor e do esforço transversal, enquanto que na direção transversal se apresentam os máximos dos momentos flectores positivos e negativos. No dimensionamento de tabuleiros de pontes, assume especial importância o momento fletor na direção longitudinal, bem como o esforço transversal, ainda que com menos relevância. Por este motivo, é dado, ao longo de todo o capítulo, mais ênfase aos resultados na direção longitudinal do que aos esforços na direção transversal. De facto, no caso do tabuleiro em laje nervurada, decidiu-se não considerar, de todo, estes esforços. Esta abordagem justifica-se com o facto de que, ao contrário do primeiro caso de estudo em que a disposição de vigas principais origina distribuições relevantes dos momentos flectores na direção transversal, neste caso não se prevê que existam fenómenos particularmente notáveis na distribuição destes esforços.

4.2 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS E DISPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

4.2.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi concretizada com recurso ao software *Microsoft Excel* e de forma ligeiramente distinta nos dois casos de estudo, consequência das diferenças entre os dois tabuleiros. Os traços comuns dessa análise serão agora descritos.

Terminado o cálculo estrutural dos modelos por intermédio do software *Robot Structural Analysis*, utilizou-se a interface de leitura de resultados através de tabelas disponibilizada nesse mesmo software. A partir dessa interface foram exportados os resultados de cada modelo para ficheiros com extensão .csv – ficheiro de valores separados por vírgulas do *Microsoft Excel*. Explorando as potencialidades de apresentação de resultados em forma de tabelas do software de cálculo estrutural foram definidas formas padronizadas de expor a informação para posterior exportação. O *Robot Structural Analysis* apresenta em tabelas distintas os resultados para os elementos do tipo barra e para os elementos do tipo casca, razão pela qual, no caso dos tabuleiros vigados, foi necessário exportar dois ficheiros para cada modelo. Este problema não se põe para o caso dos tabuleiros em laje nervurada, uma vez que foram modelados inteiramente com recurso a elementos do tipo casca.

Posteriormente foram desenvolvidas, no âmbito este trabalho, folhas no *Microsoft Excel* que, utilizando os dados dos ficheiros exportados pelo *Robot Structural Analysis*, procedem à análise integrada dos dados, ou seja, que permitem uma análise conjunta dos resultados para os vários vãos de cada regulamento. Estas folhas de cálculo servem-se do facto de que, tal como descrito no parágrafo anterior, a disposição dos dados, definida previamente neste processo, é comum aos vários ficheiros exportados pelo software de cálculo estrutural. Desta forma é possível repetir e padronizar processos utilizando folhas de cálculo idênticas para analisar modelos diferentes.

O produto final facultado pelas diferentes folhas de cálculo consiste nos valores dos esforços nas estruturas sujeitas à ação de um determinado regulamento, discriminados conforme o modelo de carga e em função do comprimento do vão, apresentados em forma de tabela e em gráficos de barras. Em alternativa são também fornecidos os dados expostos mais adiante neste capítulo que apresentam em forma de tabela os resultados para cada vão, discriminando os valores em função do regulamento e respetivo modelo de carga e em forma de gráficos de barras os esforços de cada regulamento em relação ao RSA para cada vão.

O desenvolvimento destas ferramentas de análise revelou-se uma componente importante no trabalho desenvolvido, traduzindo-se em investimentos fundamentais de análise e processamento de informação claramente vantajoso, quer pelo volume de trabalho, quer pelo seu controlo e fiabilidade.

Por fim, a validação da informação assumiu-se como uma tarefa de grande relevância. Para testar os resultados fornecidos pelas folhas de cálculo e apurar eventuais erros, tanto na fase de modelação como na fase de análise de dados, foram utilizados dois processos. O primeiro consiste na observação dos resultados através de gráficos de barras avaliando a coerência dessas distribuições. Por exemplo, se observando os resultados para um determinado regulamento é notório que o valor do momento fletor para um vão de 20m é inferior ao do momento para um vão de 15m, é mais ou menos evidente que existe um erro algures no processo de modelação, cálculo e análise de dados. O segundo método é a observação esporádica dos resultados através de diagramas ou mapas de esforços disponíveis no software de cálculo estrutural e a comparação com os resultados obtidos pelo procedimento descrito nos parágrafos anteriores. Pretende-se deste modo não só detetar falhas nos modelos e nos métodos de análise de dados, como também averiguar a existência de resultados cientificamente corretos, mas distantes da realidade. A escolha dos casos a verificar por este processo é feita de forma algo aleatória, não desprezando a

necessidade de verificar com maior frequência os casos que à partida se prevejam mais problemáticos ou mais incertos.

4.2.2 DISPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

Nos pontos que se seguem serão apresentados os valores máximos dos esforços nas estruturas modeladas, sob a forma de tabelas e gráficos. Estes resultados variam ligeiramente conforme a tipologia do tabuleiro e de acordo com os efeitos analisados. Importa recordar que os resultados são apresentados nos seus valores de cálculo, tendo-se considerado para o efeito os coeficientes parciais de segurança expostos na Tabela 2.2.

Para cada vão é apresentada, em primeiro lugar, uma tabela com os valores do momento fletor e do esforço transversal na direção longitudinal provocados pela aplicação de cada um dos modelos de carga prescritos nos vários regulamentos. Com estas tabelas pretende-se dar uma ideia global dos efeitos de cada modelo de carga na estrutura, permitindo averiguar quais os modelos com efeitos mais graves para cada regulamento.

Como foi referido anteriormente, o RSA foi considerado como regulamento de referência. Assim, as análises comparativas são expressas em relação a este regulamento.

De seguida exibem-se dois gráficos de barras que demonstram o valor relativo dos efeitos da aplicação na estrutura do modelo de carga mais grave de cada regulamento. Estes valores são apresentados em relação aos efeitos decorrentes da aplicação do modelo de carga prescrito no RSA que seja mais grave para a estrutura em causa. O primeiro gráfico apresenta os valores relativos ao momento fletor máximo enquanto que no segundo se explicitam os valores máximos do esforço transversal, ambos na direção longitudinal. Desta forma, os valores que surgem no primeiro e segundo gráficos correspondem respetivamente a:

$$\frac{Ml_{(Ri)}}{Ml_{(RSA)}}$$

$$\frac{Fv_{(Ri)}}{Fv_{(RSA)}}$$

em que:

$Ml_{(Ri)}$ representa o valor do momento fletor máximo provocado pela aplicação das ações do regulamento i ;

$Ml_{(RSA)}$ representa o valor do momento fletor máximo provocado pela aplicação das ações do RSA;

$Fv_{(Ri)}$ representa o valor do esforço transversal máximo provocado pela aplicação das ações do regulamento i ;

$Fv_{(RSA)}$ representa o valor do esforço transversal máximo provocado pela aplicação das ações RSA.

Em cada um destes gráficos são apresentados, para cada regulamento, valores relativos aos efeitos da aplicação da carga de forma isolada, bem como resultados para a aplicação da carga combinada com a ação do peso próprio. Esta disposição permite cumprir um dos objetivos deste trabalho que é perceber de que forma a ação do peso próprio influencia os esforços nas estruturas, atenuando ou, porventura, agravando os efeitos das diferenças entre as ações prescritas nos diferentes regulamentos.

Por fim, e apenas no caso do tabuleiro de vigas pré-fabricadas, é apresentado um ponto onde são expostos os valores máximos do momento positivo e negativo na direção transversal – ou, por outras palavras, o valor mais positivo e o valor mais negativo do momento fletor nessa direção – decorrente da aplicação de todos modelos de carga de cada regulamento na estrutura com um determinado vão. De forma a reduzir a informação exposta no sentido de facilitar a interpretação dos dados, não se apresenta nesta tabela o modelo de carga a que corresponde cada valor do momento positivo e negativo, podendo esse modelo ser diferente para cada os momentos positivos e negativos. Por exemplo, no caso do tabuleiro vigado com vão de 10m sujeito às ações prescritas no EC1-2, o momento máximo positivo é provocado pela aplicação do Modelo de Carga 1, enquanto que o momento máximo negativo é provocado pelo Modelo de Carga 2. Esta distinção não é feita nas tabelas.

4.3 TABULEIRO DE VIGAS PRÉ-FABRICADO

4.3.1 ASPETOS GERAIS

Uma vez que o primeiro caso de estudo, tal como descrito no ponto 3.3, consiste numa laje de betão armado apoiada em cinco vigas pré-fabricadas, considerou-se que o local mais apropriado para avaliar os efeitos das ações rodoviárias – isoladas ou combinadas com o peso próprio – na direção longitudinal seria a viga central do tabuleiro. Desta forma, os valores máximos do momento fletor e do esforço transversal apresentados para essa direção representam os máximos na viga central do tabuleiro. Esta opção tem como principal objetivo uniformizar os resultados que vão ser comparados.

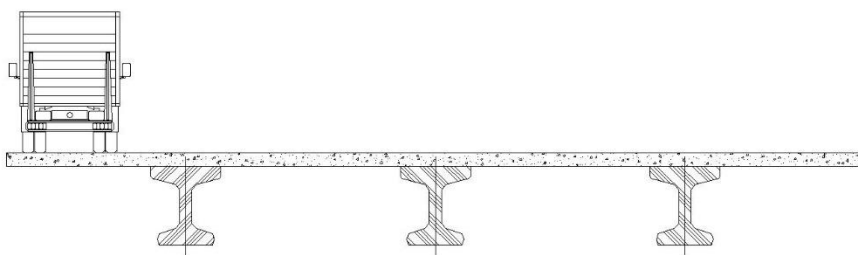
Os diferentes regulamentos analisados oferecem alguma liberdade ao utilizador no que toca à disposição dos veículos na direção transversal, no sentido de modelar as situações mais coerentes com a realidade, que permitam prever as consequências nos piores cenários possíveis. Ainda assim, essa liberdade é limitada e varia conforme o regulamento em causa.

Observe-se, a título de exemplo, o esquema da Fig. 4.1. Imagine-se que as disposições de um determinado regulamento permitiriam a aplicação de um veículo de forma a que as suas cargas fossem todas aplicadas à esquerda da viga mais à esquerda, tal como descrito na Fig. 4.1.a, enquanto que um regulamento diferente determinaria que um veículo idêntico seria colocado de forma a que as suas cargas se aplicassem todas à direita dessa mesma viga, tal como na Fig. 4.1.b.

É mais ou menos evidente que, enquanto que no segundo caso existem duas vigas a suportar as cargas desse veículo, no primeiro caso a quase totalidade do peso do veículo seria suportado unicamente pela viga mais à esquerda, provocando nessa viga momentos mais elevados do que em qualquer uma das vigas da situação anterior.

Esta situação não ocorreria, por exemplo, ao analisar um tabuleiro com secção retangular constante ao longo da sua largura. Por este motivo, considerar este aspeto na análise poderia conduzir a uma deturpação dos resultados aquando da interpretação, uma vez que estaria a considerar um regulamento como mais condicionante do que outro por questões que têm mais a ver com a estrutura analisada do que com o regulamento em si.

a) Veículo no exterior das vigas



b) Veículo entre duas vigas

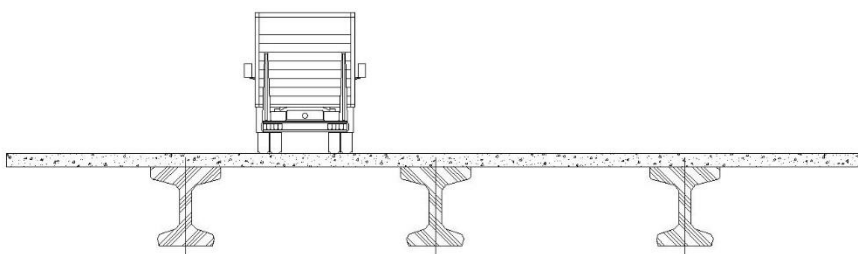


Fig. 4.1 – Posição de um veículo em relação a vigas longitudinais

Na maioria dos casos correntes de tabuleiros desta tipologia, são adotadas soluções em que todas as vigas têm a mesma secção transversal. Essa secção é dimensionada de forma a suportar os esforços na viga sujeita aos efeitos mais gravosos. Este aspeto mitiga as consequências negativas que possam decorrer desta opção.

Por último, de entre todos os modelos formulados e calculados, na maioria dos casos os momentos máximos ocorreram na viga central, o que legitima ainda mais esta opção. Este facto decorre, tal como explicado em 3.2.2, de uma tentativa, durante o processo de modelação das ações, de aplicar as ações mais gravosas no centro da estrutura.

No caso dos momentos na direção transversal não foram aplicadas estas restrições por dois motivos. Em primeiro lugar, e como foi referido anteriormente, os esforços na direção longitudinal são, quase sempre, mais condicionantes para o dimensionamento destas estruturas do que os esforços na direção transversal, pelo que, os valores são apresentados mais com carácter indicativo do que com um propósito de extrair conclusões substanciais. Além disso, o facto de estes valores serem dados para os elementos finitos que constituem a laje – ao contrário dos valores dos esforços na direção longitudinal neste caso de estudo, que são dados para as barras – torna mais difícil a localização dos esforços. Este aspeto decorre do facto de que – ao contrário das barras que assumem a mesma disposição e designação nos vários modelos – a composição das malhas de elementos finitos – calculadas automaticamente pelo software e dependentes do carregamento – e a consequente distribuição e designação de cada elemento varia de forma irremediável entre os vários regulamentos. Por este motivo, o processo de análise de dados descrito em 4.2 não se coaduna com uma avaliação localizada de esforços em elementos finitos de uma malha associada a uma determinada laje.

4.3.2 VÃO DE 10M

4.3.2.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores dos esforços de cálculo na estrutura com vão de 10m na direção longitudinal. Tal como referido anteriormente, estes esforços decorrem da aplicação de forma isolada das ações estabelecidas nos diferentes regulamentos, ou seja, aplicando separadamente a ação rodoviária e o peso próprio. Apresenta-se a negrito o valor do esforço máximo para cada regulamento.

Tabela 4.1 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 10m).

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	223	87
	Veículo	414	315
	Carga Uniforme + Carga de Faca	405	164
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	201	78
	Load Model 1	924	398
	Load Model 2	352	197
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	186	72
	Tandem	540	227
	Camião	464	225
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	193	75
	Sobrecarga	624	385
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	179	69
	NA(1) + NA(2)	802	324
	NA(3)	197	152
	NB36	569	359
	NC	304	139
SNiP (Russo)	Peso Próprio	164	63
	AK	405	175
	HK-80	366	154
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	201	77
	Load Model 1	918	390
	Load Model 2	296	156
IRC (Indiano)	Peso Próprio	201	78
	Class 70R	470	225
	Class A	1107	455
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	186	72
	Tandem	647	283
	Camião	536	295
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	171	66
	Camião	549	284
	Camião + Carga Uniforme	606	274

Na Fig. 4.2 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA. Tal como referido, este rácio é apresentado tanto para a aplicação isolada dos modelos de carga como para a aplicação combinada da ação rodoviária com o peso próprio.

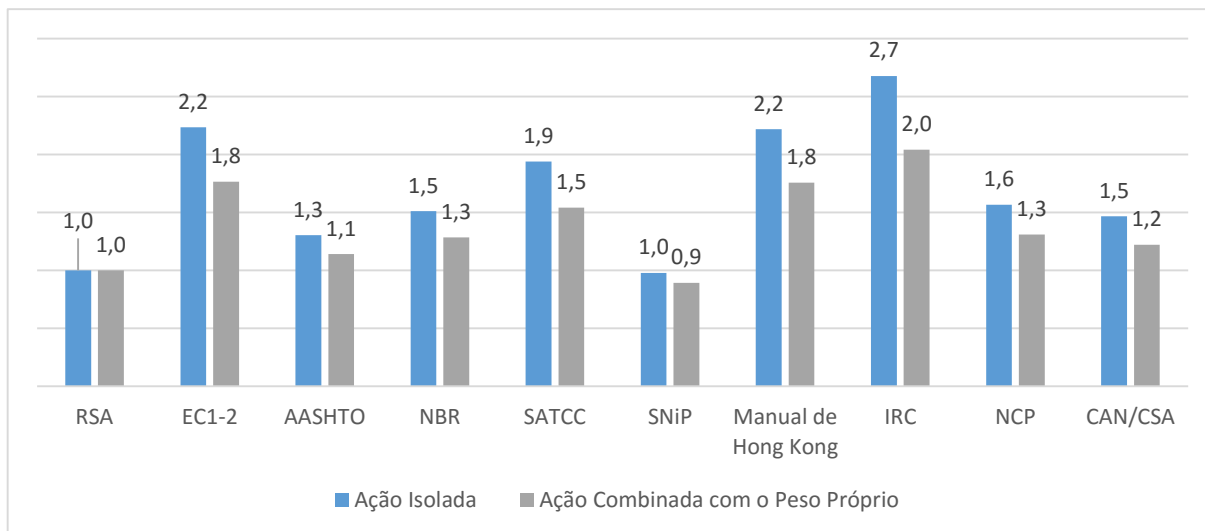


Fig. 4.2 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 10m)

É claramente visível que o regulamento com efeitos mais adversos é o indiano, em que a ação isolada provoca um momento 2,7 vezes superior ao provocado pelo RSA. Nota-se também uma clara importância do peso próprio na análise. Por exemplo, no regulamento indiano o momento decorrente da aplicação isolada das cargas é 2,7 vezes superior ao valor análogo do RSA, enquanto que o efeito da aplicação combinada com o peso próprio é 2 vezes superior ao regulamento português, ou seja, a diferença é de 70 pontos percentuais. O único regulamento que provoca momentos inferiores aos do RSA é o SNiP, sendo que este fenómeno só ocorre quando se considera o efeito do peso próprio. Nesse caso, o momento é 10% inferior ao do RSA.

De forma análoga, na Fig. 4.3 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

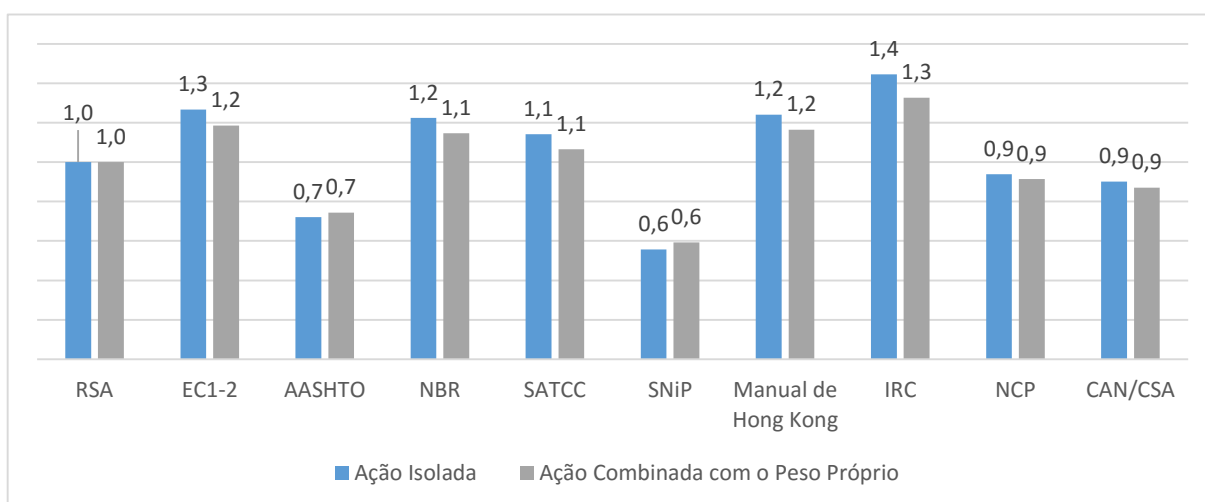


Fig. 4.3 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 10m)

Também aqui o regulamento mais penoso é o IRC-S6-06: os seus efeitos são 40% superiores aos do RSA, quando a carga é aplicada isoladamente. O peso próprio não é tão preponderante neste caso, uma vez que a consideração desta ação provoca na generalidade dos casos diferenças da ordem dos 10%. A aplicação dos regulamentos americano, colombiano e russo provoca esforços transversos na estrutura inferiores aos decorrentes da aplicação do RSA, sendo que o valor mínimo é o correspondente ao SNiP – cerca de 60% do esforço transverso resultante da aplicação do RSA tanto para a ação isolada como para a ação combinada com o peso próprio.

4.3.2.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.2 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 10m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	64,5	-15,2
EC1-2 (Europeu)	111,5	-37,3
AASHTO (Americano)	53,4	-23,4
NBR (Brasileiro)	73,2	-13,2
SATCC (Sul-Africano)	79,7	-15,6
SNiP (Russo)	54,6	-14,1
Manual de Hong Kong	116,2	-36,7
IRC (Indiano)	146,5	-7,9
NCP (Colombiano)	78,1	-27,6
CAN/CSA (Canadiano)	80,9	-51,0

A norma indiana provoca os momentos positivos mais severos: 146,5kNm positivos. No caso dos momentos negativos, o regulamento mais condicionante é o EC1-2, cuja aplicação provoca momentos de -37,3kNm na direção longitudinal. Os regulamentos que provocam momentos mais reduzidos na direção transversal são o americano (53,4kNm) no que diz respeito aos momentos positivos e o indiano (-7,9kNm) quanto aos negativos.

4.3.3 VÃO DE 15M

4.3.3.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura com vão de 15m na direção longitudinal.

Tabela 4.3 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 15m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	649	169
	Veículo	738	370
	Carga Uniforme + Carga de Faca	774	218
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	584	152
	Load Model 1	1701	545
	Load Model 2	588	249
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	541	141
	Tandem	985	300
	Camião	1010	316
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	563	146
	Sobrecarga	1261	496
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	519	135
	NA(1) + NA(2)	1891	530
	NA(3)	336	200
	NB36	869	440
	NC	805	269
SNiP (Russo)	Peso Próprio	476	124
	AK	753	253
	HK-80	654	210
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	584	152
	Load Model 1	1658	534
	Load Model 2	468	198
IRC (Indiano)	Peso Próprio	584	152
	Class 70R	853	313
	Class A	1718	641
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	541	141
	Tandem	1159	377
	Camião	1173	525
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	498	130
	Camião	1123	340
	Camião + Carga Uniforme	1055	317

Na Fig. 4.4 apresenta-se o rácio entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

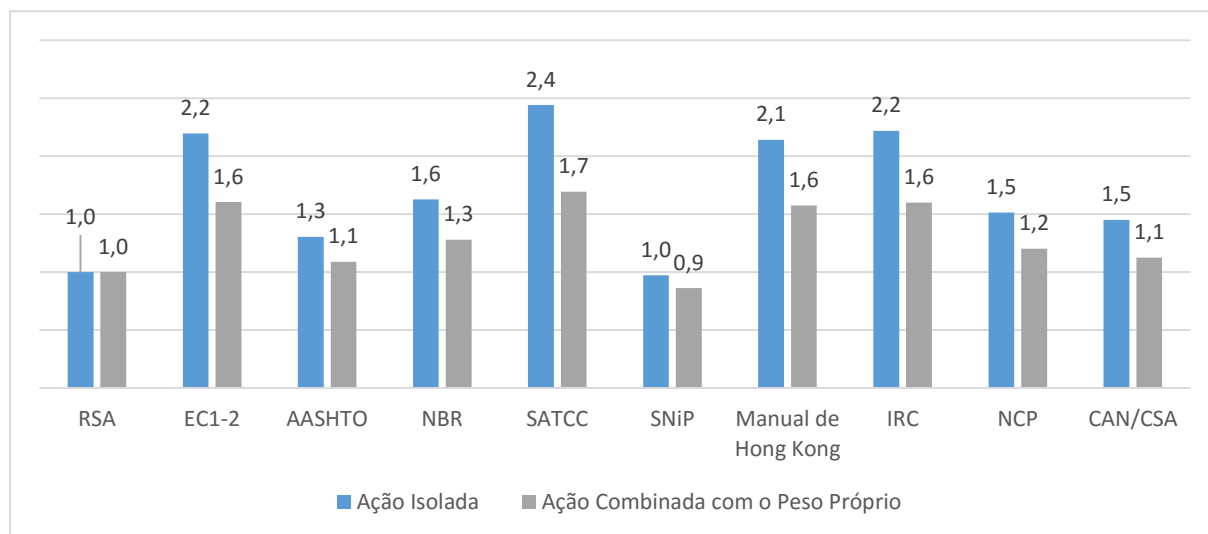


Fig. 4.4 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 15m)

A aplicação isolada das cargas rodoviárias prescritas no código sul-africano provoca efeitos 2,4 vezes superiores aos correspondentes à aplicação das cargas do RSA, fazendo dele o regulamento que provoca efeitos mais gravosos nestas condições. Quando se considera o efeito do peso próprio este valor desce cerca de 70 pontos percentuais para 1,7, não retirando a este código o estatuto de regulamento mais gravoso. O regulamento com efeitos menos gravosos é o russo – aproximadamente 100% e 90% dos valores do RSA para a ação isolada e combinada com o peso próprio, respetivamente.

Da mesma forma, na Fig. 4.5 exibem-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

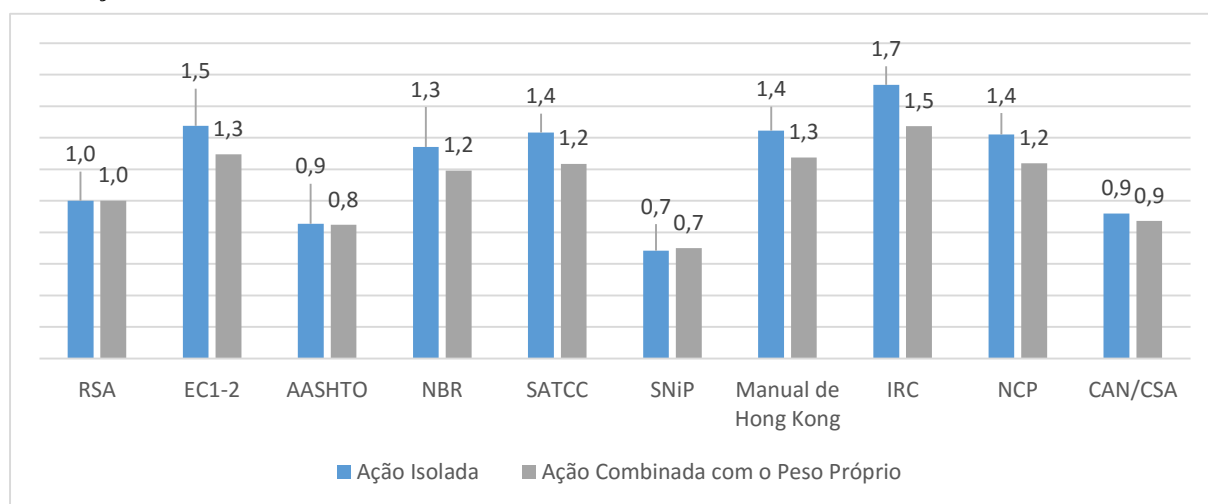


Fig. 4.5 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 15m)

A aplicação isolada das cargas rodoviárias indianas provoca esforços transversos 1,7 vezes superiores na estrutura comparando com os valores relativos ao RSA e a aplicação combinada com o peso próprio conduz a efeitos 1,5 vezes superiores ao regulamento português, fazendo deste o regulamento mais

severo neste caso. A norma russa é a menos severa, com valores cerca de 30% inferiores aos do RSA nos dois casos.

4.3.3.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.4 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 15m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	81,7	-21,4
EC1-2 (Europeu)	124,2	-48,3
AASHTO (Americano)	85,8	-29,2
NBR (Brasileiro)	93,0	-18,8
SATCC (Sul-Africano)	75,1	-32,9
SNiP (Russo)	59,4	-16,8
Manual de Hong Kong	123,6	-50,0
IRC (Indiano)	128,3	-30,2
NCP (Colombiano)	94,3	-31,4
CAN/CSA (Canadiano)	73,8	-32,3

Continua a ser a norma indiana a norma mais gravosa no que diz respeito aos momentos positivos 128,3kNm. No caso dos momentos negativos, o Manual de Hong Kong é o mais condicionante, com valores de -50kNm. O código mais brando neste aspeto é o russo, em ambas situações – 59,4kNm positivos e 16,8kNm negativos.

4.3.4 VÃO DE 20M

4.3.4.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.5 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura com vão de 20m na direção longitudinal.

Tabela 4.5 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 20m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	1333	262
	Veículo	1082	404
	Carga Uniforme + Carga de Faca	1248	259
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	1200	236
	Load Model 1	2603	652
	Load Model 2	835	274
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	1111	218
	Tandem	1494	349
	Camião	1610	382
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	1155	227
	Sobrecarga	2032	579
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	1066	210
	NA(1) + NA(2)	2072	456
	NA(3)	463	223
	NB36	1305	499
	NC	1014	273
SNiP (Russo)	Peso Próprio	978	192
	AK	1105	290
	HK-80	959	250
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	1200	236
	Load Model 1	2526	635
	Load Model 2	669	220
IRC (Indiano)	Peso Próprio	1200	236
	Class 70R	1239	379
	Class A	2280	727
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	1111	219
	Tandem	1750	444
	Camião	1861	593
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	1022	201
	Camião	1465	424
	Camião + Carga Uniforme	1451	402

Na Fig. 4.6 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

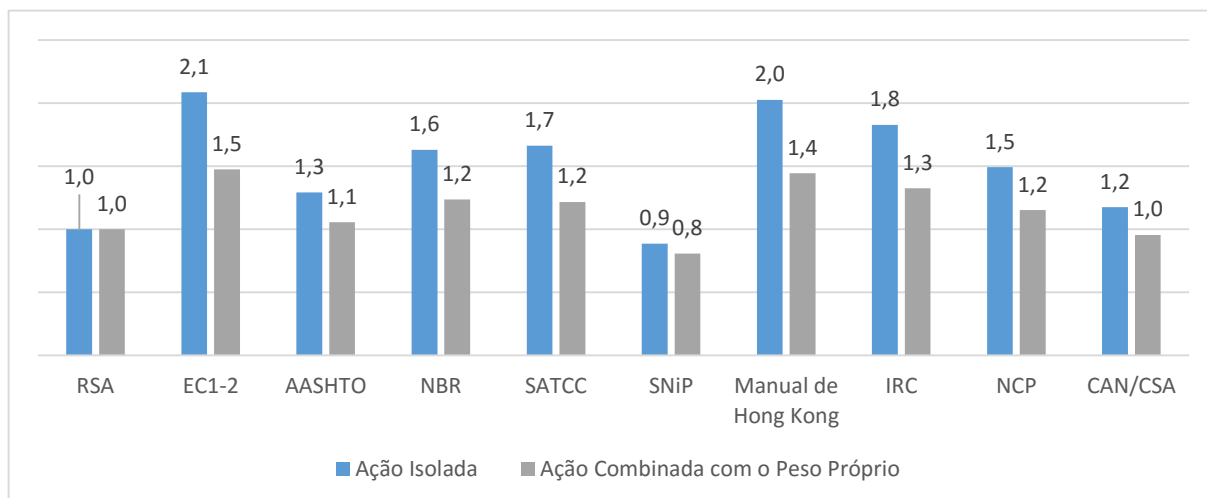


Fig. 4.6 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 20m)

A norma russa é a que acarreta momentos fletores menos gravosos na direção longitudinal para um vão de 20m: 0,9 e 0,8 vezes os correspondentes ao RSA isoladamente e considerando o peso próprio, respetivamente. Este é o único regulamento que produz efeitos inferiores aos do RSA. Por outro lado, os momentos mais elevados surgem com a aplicação do EC1-2: 2,1 vezes os momentos decorrentes da aplicação do RSA isoladamente e 1,5 vezes considerando a ação do peso próprio.

De forma semelhante, na Fig. 4.7 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

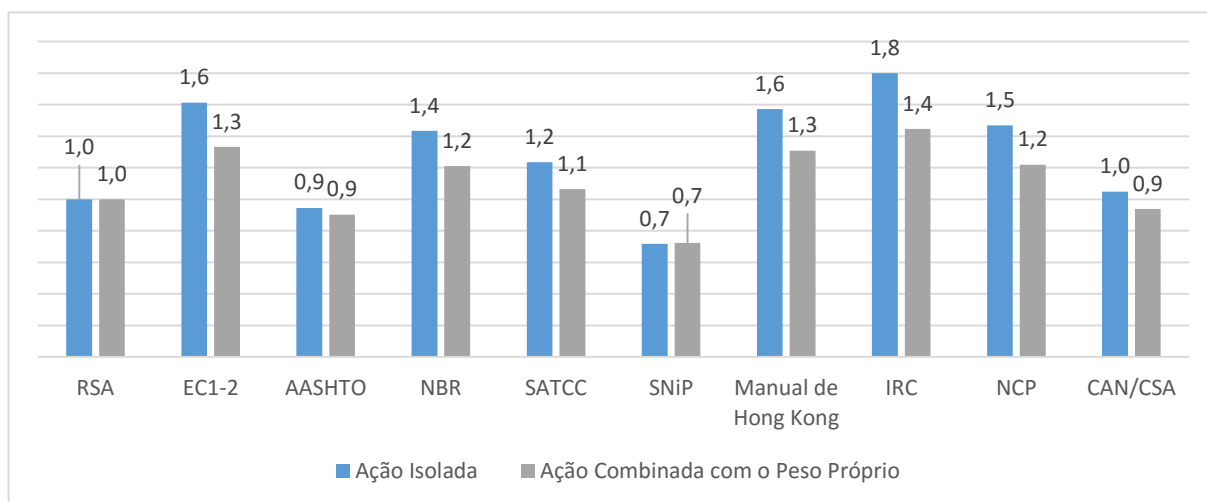


Fig. 4.7 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 20m)

As especificações norte-americanas e a norma russa provocam esforços transversos de valor inferior aos do RSA: 0,9 para a norma AASHTO com e sem a consideração do peso próprio e 0,7 para a norma SNiP, também nos dois casos. Pelo contrário, o código indiano provoca esforços transversos 1,8 vezes

superiores aos do RSA considerando a atuação isolada das ações rodoviárias e 1,4 vezes atuando em conjunto com o peso próprio.

4.3.4.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.6 exibem-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.6 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 20m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	75,1	-25,2
EC1-2 (Europeu)	122,5	-53,5
AASHTO (Americano)	66,2	-34,1
NBR (Brasileiro)	87,8	-23,5
SATCC (Sul-Africano)	80,3	-33,7
SNiP (Russo)	61,2	-24,5
Manual de Hong Kong	122,7	-56,6
IRC (Indiano)	102,9	-34,4
NCP (Colombiano)	95,7	-34,6
CAN/CSA (Canadiano)	80,9	-34,2

Quanto aos momentos positivos, os mais gravosos são os produzidos pelo Manual de Hong Kong (122,7kNm) enquanto que os mais reduzidos são os correspondentes ao SNiP (61,2kNm). No que diz respeito aos momentos negativos, os momentos mais significativos são, mais uma vez, os que decorrem da aplicação do Manual de Hong Kong (-56,6kNm) e os menos onerosos são os correspondentes à NBR 7188 (-23,5kNm).

4.3.5 VÃO DE 25M

4.3.5.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.7 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura com vão de 25m na direção longitudinal.

Tabela 4.7 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 25m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	2331	368
	Veículo	1393	429
	Carga Uniforme + Carga de Faca	1738	296
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	2098	331
	Load Model 1	3507	738
	Load Model 2	1024	288
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	1942	307
	Tandem	2000	386
	Camião	2265	432
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	2020	319
	Sobrecarga	2871	647
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	1865	295
	NA(1) + NA(2)	2947	531
	NA(3)	594	236
	NB36	1810	552
	NC	1379	321
SNiP (Russo)	Peso Próprio	1709	270
	AK	1440	311
	HK-80	1239	273
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	2097	331
	Load Model 1	3386	712
	Load Model 2	830	234
IRC (Indiano)	Peso Próprio	2097	331
	Class 70R	1618	424
	Class A	3204	787
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	1942	307
	Tandem	2331	493
	Camião	2611	644
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	1787	282
	Camião	1930	475
	Camião + Carga Uniforme	1994	461

Na Fig. 4.8 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

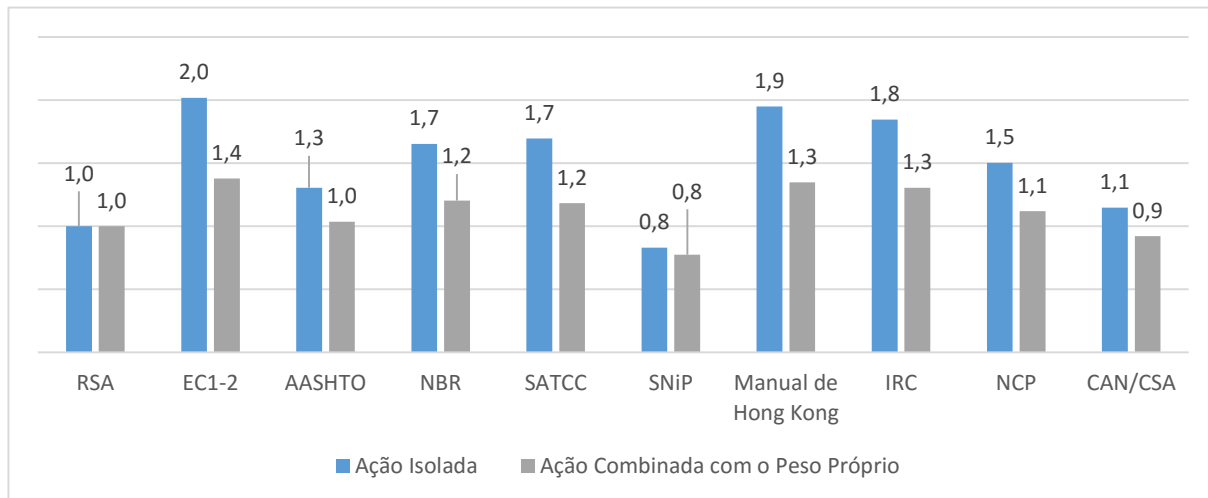


Fig. 4.8 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 25m)

A norma SNiP oferece os valores mais baixos do momento na direção longitudinal – cerca de 80% do momento relativo à aplicação do RSA quer quanto à aplicação da carga isolada como combinada com o peso próprio – o EC1-2 é o que concede valores mais elevados do momento decorrente da aplicação isolada das ações – 2 vezes o valor correspondente ao RSA – e também do momento resultante da combinação com o peso próprio – 1,4 vezes o valor correspondente ao RSA.

De forma análoga, na Fig. 4.7 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

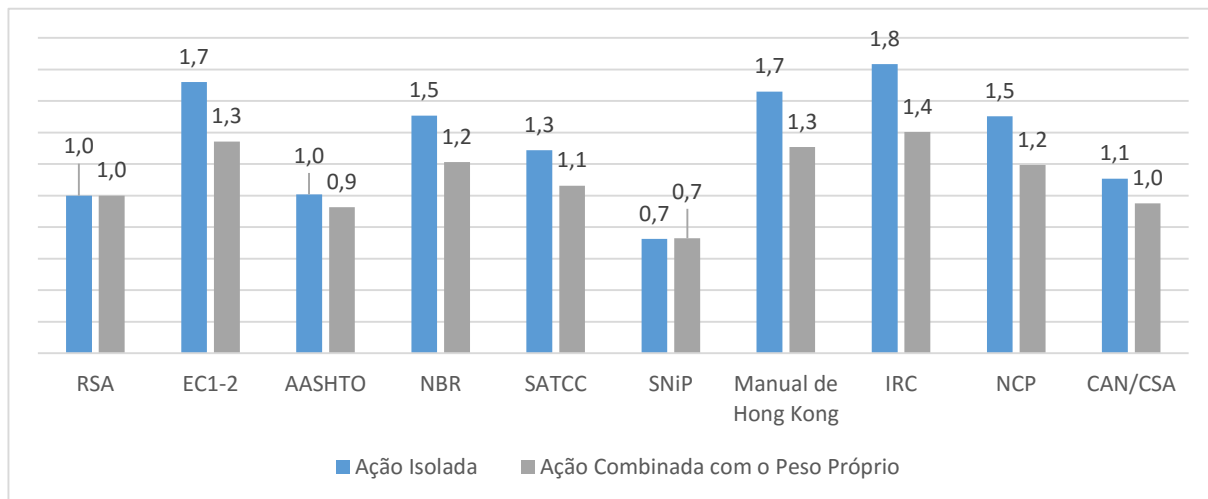


Fig. 4.9 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 25m)

A aplicação isolada das cargas rodoviárias estabelecidas na norma AASHTO resulta num valor do esforço transversal aproximadamente igual ao decorrente da aplicação das cargas prescritas no RSA. No entanto, da aplicação combinada com o peso próprio surgem valores algo diferentes: o esforço transversal provocado pela aplicação da norma americana é cerca de 90% do valor análogo para o

regulamento português. A norma SNiP é o outro caso em que os valores ficam aquém dos resultantes da aplicação do RSA (cerca de 70% com e sem o peso próprio). O caso mais problemático é de novo o do código indiano: 1,8 vezes os efeitos do RSA para a ação isolada e 1,4 para a ação combinada com o peso próprio.

4.3.5.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.8 apresentam-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.8 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 25m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	77,0	-27,3
EC1-2 (Europeu)	126,2	-54,4
AASHTO (Americano)	81,6	-34,5
NBR (Brasileiro)	85,7	-25,5
SATCC (Sul-Africano)	77,8	-33,4
SNiP (Russo)	59,5	-24,8
Manual de Hong Kong	120,1	-58,9
IRC (Indiano)	106,8	-37,7
NCP (Colombiano)	96,9	-40,4
CAN/CSA (Canadiano)	84,1	-35,0

Tanto no caso dos momentos positivos como no dos momentos negativos, o regulamento menos exigente é o russo – 59,5kNm positivos e 24,8kNm negativos. Os regulamentos mais condicionantes são o EC1-2 no caso dos momentos positivos (126,2kNm) e o o Manual de Hong Kong no caso dos momentos negativos (-58,9kNm).

4.3.6 VÃO DE 30M

4.3.6.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.9 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura com vão de 30m na direção longitudinal.

Tabela 4.9 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 30m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	3852	508
	Veículo	1803	450
	Carga Uniforme + Carga de Faca	2380	333
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	3467	457
	Load Model 1	4666	823
	Load Model 2	1326	307
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	3210	423
	Tandem	2650	423
	Camião	3027	481
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	3339	440
	Sobrecarga	3962	721
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	3082	406
	NA(1) + NA(2)	3717	576
	NA(3)	750	250
	NB36	2447	597
	NC	1845	372
SNiP (Russo)	Peso Próprio	2825	373
	AK	1853	333
	HK-80	1588	297
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	3467	458
	Load Model 1	4478	789
	Load Model 2	1068	249
IRC (Indiano)	Peso Próprio	3467	458
	Class 70R	2082	474
	Class A	4320	836
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	3210	424
	Tandem	3098	546
	Camião	3510	699
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	2954	390
	Camião	2653	521
	Camião + Carga Uniforme	2792	518

Na Fig. 4.10 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

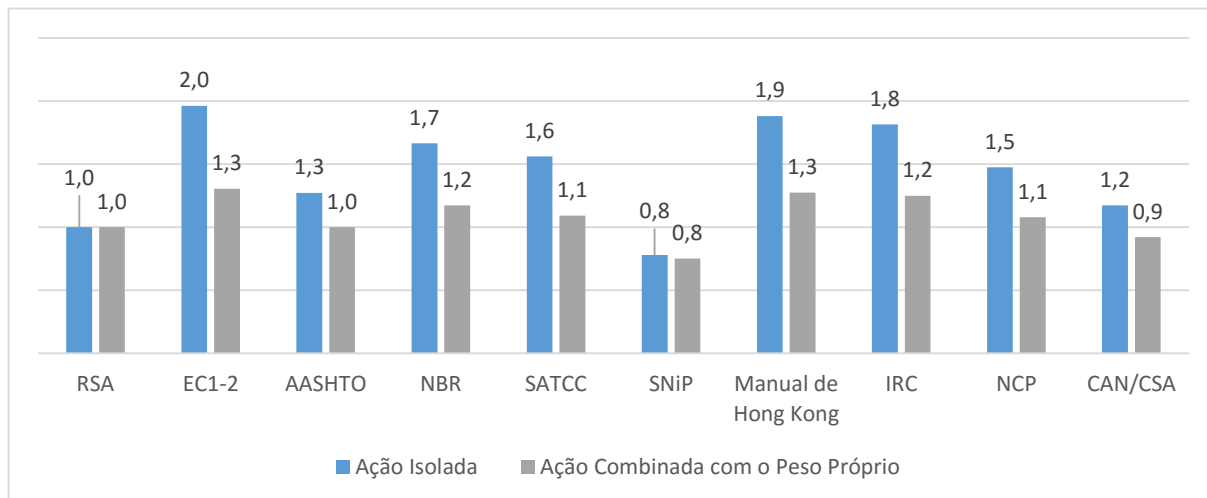


Fig. 4.10 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 30m)

No que diz respeito à ação isolada das ações rodoviárias, o regulamento com efeitos mais perniciosos é o EC1-2 – momento fletor 2 vezes superior ao do RSA – e o regulamento com efeitos mais amenos é o SNiP – 0,8 vezes o momento do RSA. Quanto à ação combinada com o peso próprio, o regulamento com efeitos mais leves é de novo o russo – momento cerca de 20% inferior ao do RSA – e os mais severos são o EC1-2 e o Manual de Hong Kong – momento cerca de 30% superior ao do RSA.

De igual forma, na Fig. 4.11 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA para um vão de 30m.

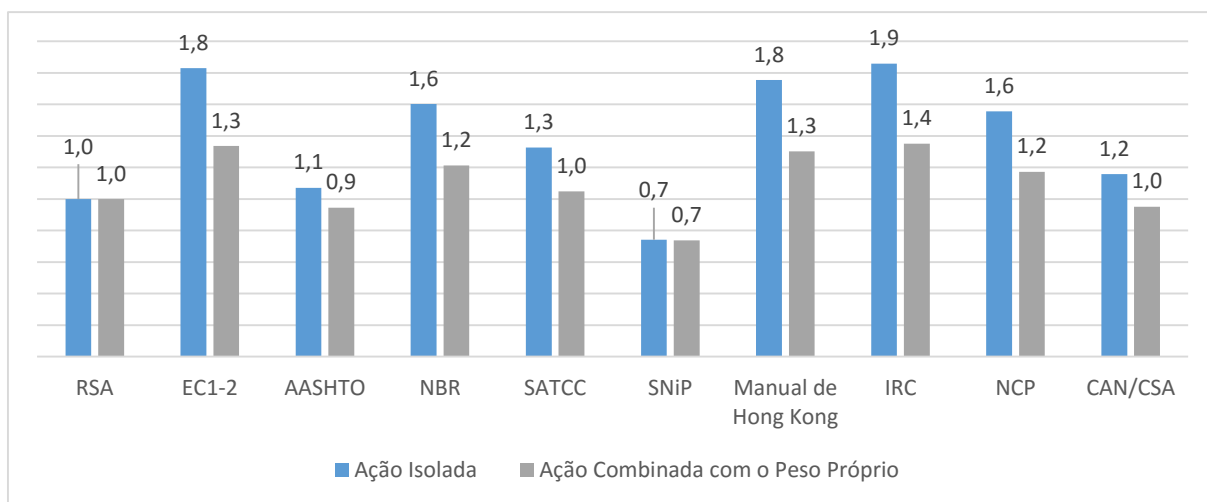


Fig. 4.11 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 30m)

O regulamento mais problemático é o indiano – cerca de 190% dos efeitos do RSA para a aplicação isolada da carga rodoviária e 140% para a aplicação combinada com o peso próprio – enquanto que o menos gravoso é, mais uma vez, o russo – cerca de 70% dos efeitos do RSA nas duas situações.

4.3.6.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.10 apresentam-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.10 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 30m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	70,0	-30,1
EC1-2 (Europeu)	114,6	-57,8
AASHTO (Americano)	83,3	-36,3
NBR (Brasileiro)	82,2	-29,1
SATCC (Sul-Africano)	76,4	-42,1
SNiP (Russo)	54,5	-23,6
Manual de Hong Kong	126,1	-62,6
IRC (Indiano)	99,3	-42,2
NCP (Colombiano)	76,0	-12,0
CAN/CSA (Canadiano)	66,3	-40,2

O Manual e Hong Kong é o que acarreta efeitos mais adversos ao nível dos momentos na direção transversal positivos e negativos – 126,1kNm e -62,6kNm. Os momentos positivo e negativo mais reduzidos resultam da aplicação do SNiP (54,5kNm) e da NCP (-12,0kNm) respetivamente.

4.3.7 VÃO DE 40M

4.3.7.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 4.11 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura com vão de 40m na direção longitudinal.

Tabela 4.11 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro vigado com vão de 40m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	8075	802
	Veículo	2442	469
	Carga Uniforme + Carga de Faca	3735	397
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	7268	722
	Load Model 1	6924	946
	Load Model 2	1756	322
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	6730	669
	Tandem	3898	474
	Camião	4537	545
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	6999	695
	Sobrecarga	6195	828
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	6461	642
	NA(1) + NA(2)	6164	720
	NA(3)	998	261
	NB36	2447	655
	NC	2614	438
SNiP (Russo)	Peso Próprio	5922	588
	AK	2593	355
	HK-80	2154	317
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	7268	722
	Load Model 1	6608	890
	Load Model 2	1418	261
IRC (Indiano)	Peso Próprio	7268	722
	Class 70R	2831	521
	Class A	6315	881
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	6729	669
	Tandem	4533	614
	Camião	5114	725
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	6191	615
	Camião	3977	564
	Camião + Carga Uniforme	4399	586

Na Fig. 4.12 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

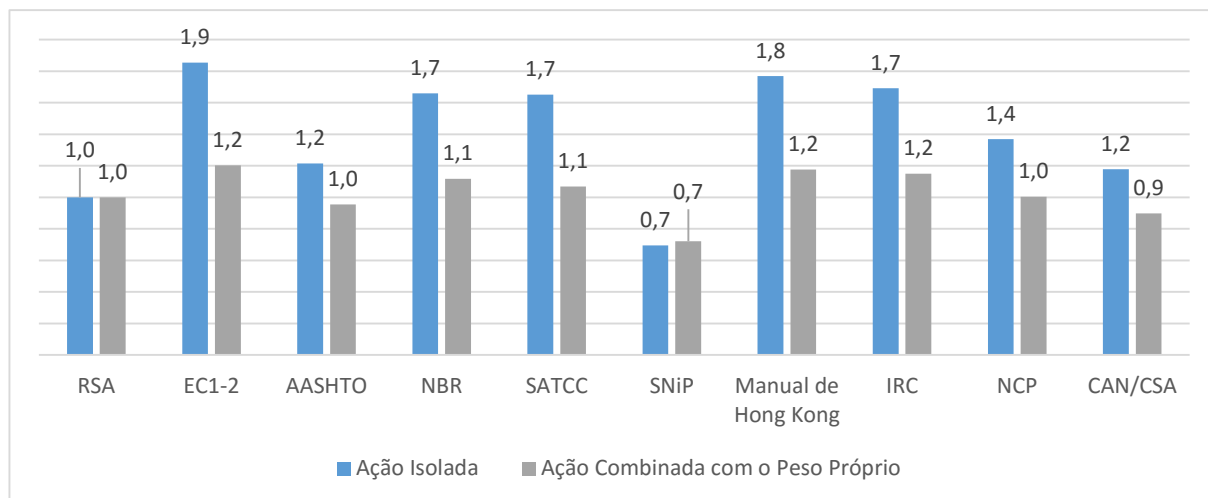


Fig. 4.12 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 40m)

Os momentos mais gravosos surgem da aplicação do EC1-2 – 1,9 vezes o efeito do RSA para a ação isolada e 1,2 vezes para a ação combinada – e os menos gravosos resultam da aplicação do SNiP – 0,7 vezes os valores do RSA para aplicação isolada e para a ação combinada.

De forma análoga, na Fig. 4.7 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

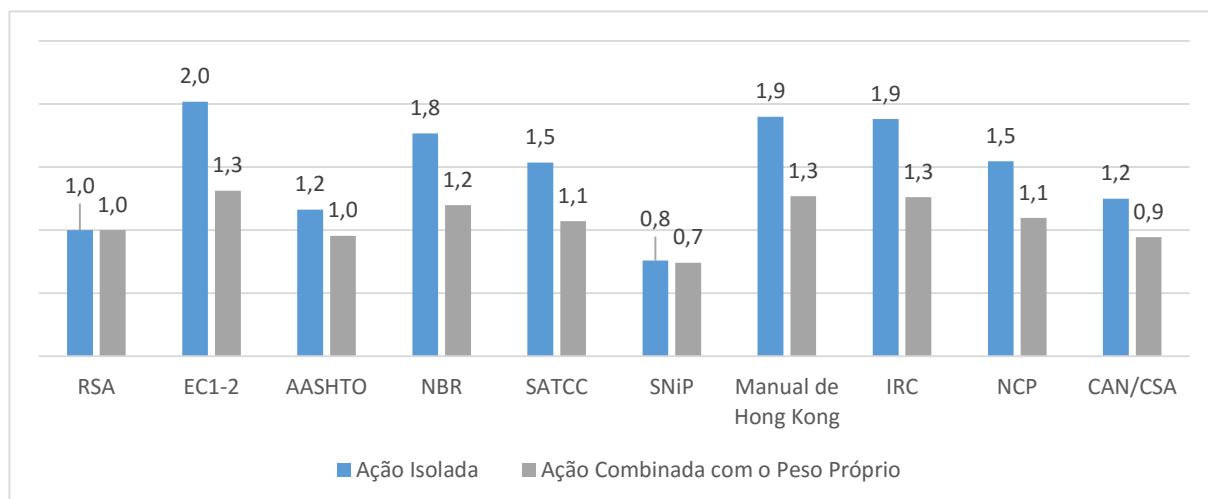


Fig. 4.13 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro vigado com vão de 40m)

Os esforços transversos mais gravosos surgem da aplicação do EC1-2 – o dobro do efeito do RSA para a ação isolada e 1,3 vezes para a ação combinada – e, mais uma vez, os menos gravosos resultam da aplicação do SNiP – cerca de 0,8 vezes os valores do RSA para aplicação isolada e 0,7 vezes para a ação combinada.

4.3.7.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos na direção transversal.

Tabela 4.12 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (tabuleiro vigado com vão de 40m)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	76,5	-32,3
EC1-2 (Europeu)	144,2	-60,6
AASHTO (Americano)	87,9	-34,3
NBR (Brasileiro)	86,3	-30,1
SATCC (Sul-Africano)	83,6	-39,4
SNiP (Russo)	51,3	-23,1
Manual de Hong Kong	125,7	-65,0
IRC (Indiano)	91,0	-42,7
NCP (Colombiano)	110,4	-47,1
CAN/CSA (Canadiano)	66,6	-38,6

O momento positivo mais gravoso resulta da aplicação das cargas rodoviárias instituídas no EC1-2 (144,2kNm) enquanto que o seu congénere negativo surge da aplicação do Manual de Hong Kong (-65,0kNm). Por outro lado, os momentos mais reduzidos surgem, nos dois casos, da aplicação do SNiP (51,3kNm e -23,21kNm).

4.3.8 COMPARAÇÃO GLOBAL

4.3.8.1 MOMENTO FLETOR

O gráfico da Fig. 4.14 consiste numa representação tridimensional que engloba os resultados relativos a todos os regulamentos estudados representando a evolução dos momentos fletores (em valor absoluto) na estrutura em função do vão. Na sua sequência, apresenta-se a Tabela 4.13, onde se expõem os rácios entre o valor do momento decorrente da aplicação de cada regulamento em relação ao RSA, para cada vão. Estes valores dizem respeito à ação rodoviária combinada com o peso próprio.

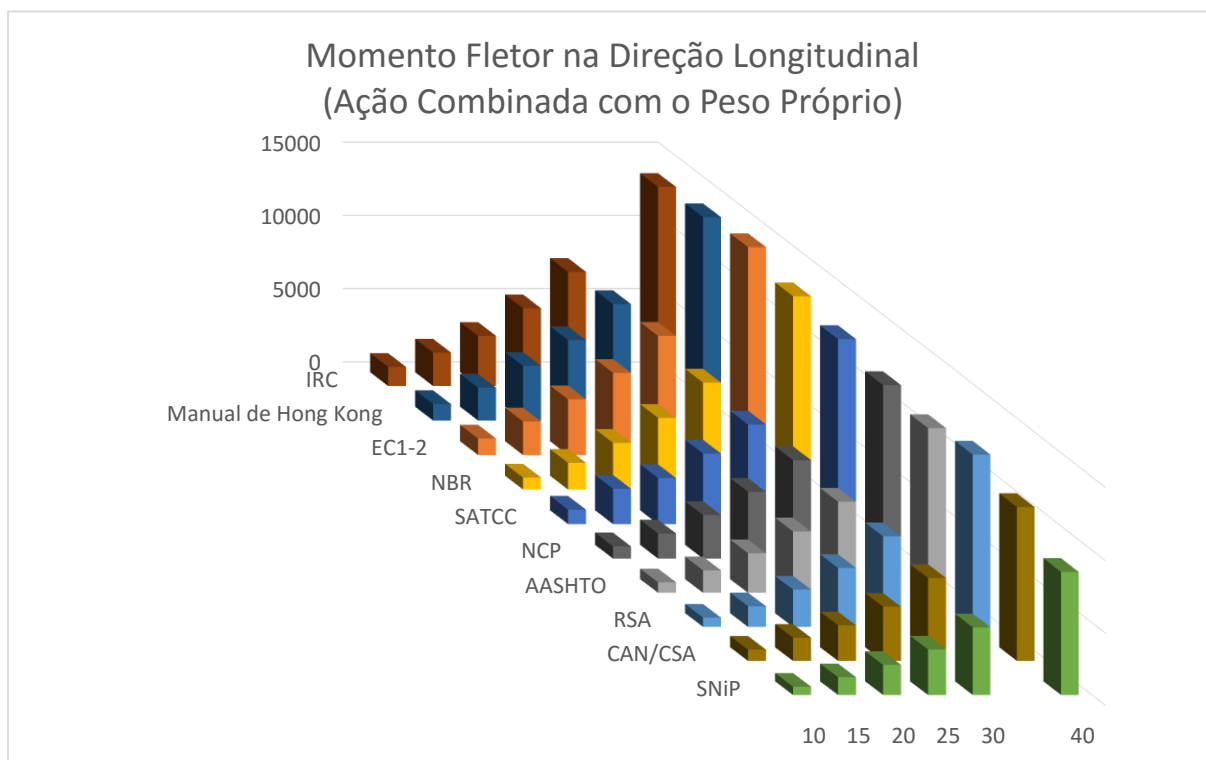


Fig. 4.14 – Representação tridimensional do momento fletor na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro vigado)

Tabela 4.13 – Rácio entre o momento fletor na estrutura para cada regulamento em relação ao RSA e em função do vão (tabuleiro vigado)

Regulamento \ Vão	10	15	20	25	30	40
SNiP (Russo)	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7
CAN/CSA (Canadiano)	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9
RSA (Português)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AASHTO (Americano)	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
NCP (Colombiano)	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
SATCC (Sul-Africano)	1,5	1,7	1,2	1,2	1,1	1,1
NBR (Brasileiro)	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1
EC1-2 (Europeu)	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
Manual de Hong Kong	1,8	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2
IRC (Indiano)	2,0	1,6	1,3	1,3	1,2	1,2

Importa apontar as diferenças entre os resultados relativos ao RSA e os relativos ao EC1-2 que atingem, para o vão de 10m diferenças de 80%. É ainda de notar que as diferenças se vão esbatendo com a evolução do vão, por exemplo, para o vão de 10m, aplicando-se as cargas do regulamento da IRC, obtêm-se momentos com o dobro da intensidade dos relativos ao RSA, enquanto que, aplicando o mesmo regulamento ao vão de 40m, as diferenças em relação aos resultados do RSA são de apenas 20%.

4.3.8.2 ESFORÇO TRANSVERSO

De forma análoga ao que se apresentou no ponto anterior, o gráfico da Fig. 4.15 consiste numa representação tridimensional que engloba os resultados relativos a todos os regulamentos estudados representando a evolução dos esforços transversos (em valor absoluto) na estrutura em função do vão. Na sua sequência, apresenta-se a Tabela 4.14, onde se expõem os rácios entre o valor do esforço transversal decorrente da aplicação de cada regulamento em relação ao RSA, para cada vão. Estes valores dizem também respeito à ação rodoviária combinada com o peso próprio.

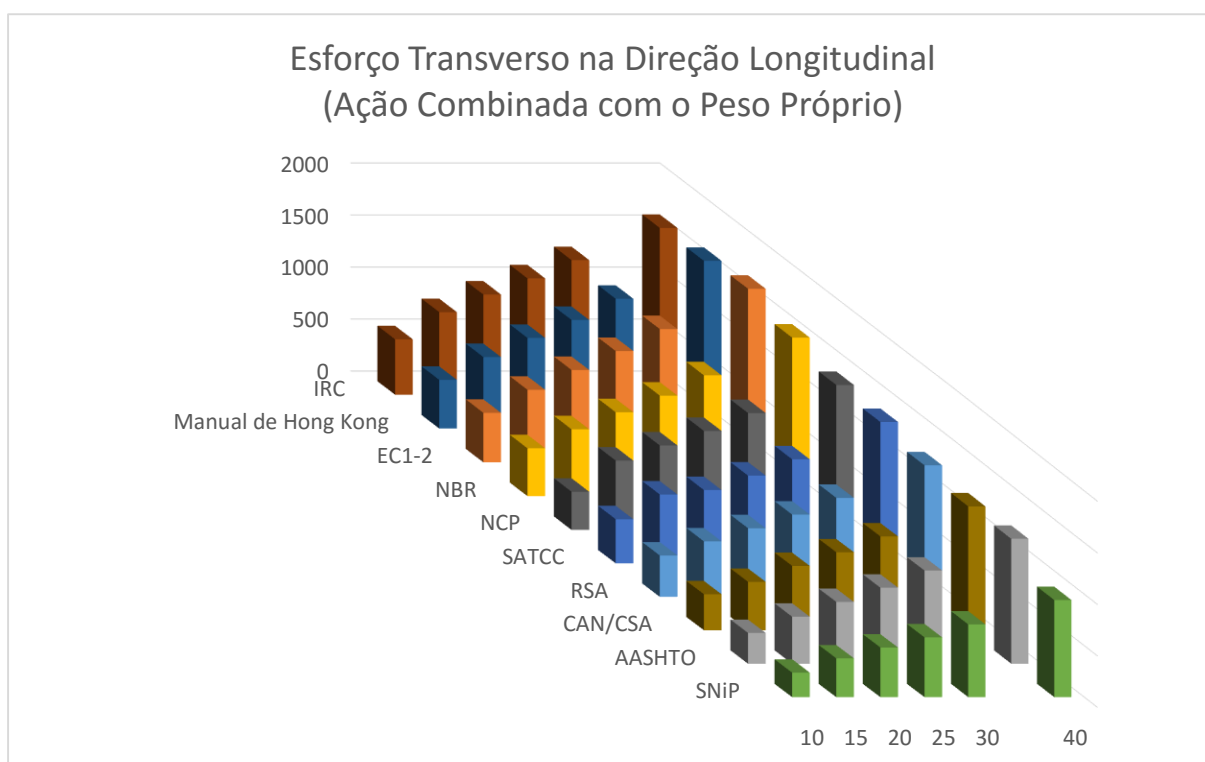


Fig. 4.15 – Representação tridimensional do esforço transversal na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro vigado)

Tabela 4.14 – Rácio entre o esforço transverso na estrutura para cada regulamento em relação aorsa e em função do vão (tabuleiro vigado)

Regulamento \ Vão	10	15	20	25	30	40
SNiP (Russo)	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
AASHTO (Americano)	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0
CAN/CSA (Canadiano)	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9
RSA (Português)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SATCC (Sul-Africano)	1,1	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1
NCP (Colombiano)	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
NBR (Brasileiro)	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
EC1-2 (Europeu)	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Manual de Hong Kong	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
IRC (Indiano)	1,3	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3

Para este tipo de esforço as diferenças entre os resultados relativos ao RSA e os relativos ao EC1-2 são menores, atingindo no máximo 30% para o vão de 40m. Ainda assim, importa dar nota de que a diferença entre os esforços pode alcançar os 40%, nomeadamente no caso da norma SNiP, cujos esforços transversos são, para todos os casos, inferiores aos do RSA.

4.3.9 COMPARAÇÃO ENTRE RSA E EC1-2

Tendo em conta que em Portugal se dará, num futuro próximo, a transição definitiva dos regulamentos estruturais como o RSA para os Eurocódigos, considerou-se pertinente apresentar neste ponto gráficos que ilustrem as diferenças entre os efeitos provocados pela aplicação das cargas prescritas no EC1-2 e os efeitos provocados pela aplicação das cargas definidas no RSA, bem como a forma como estas evoluem com o comprimento do vão.

Desta forma apresenta-se a Fig. 4.16, onde estão representados os rácios entre os momentos flectores provocados pela aplicação dos modelos de carga do EC1-2 e os que resultam da aplicação dos modelos de carga do RSA. Estes resultados são apresentados tanto para a aplicação isolada das cargas rodoviárias como para a sua aplicação em combinação com o peso próprio estrutural.

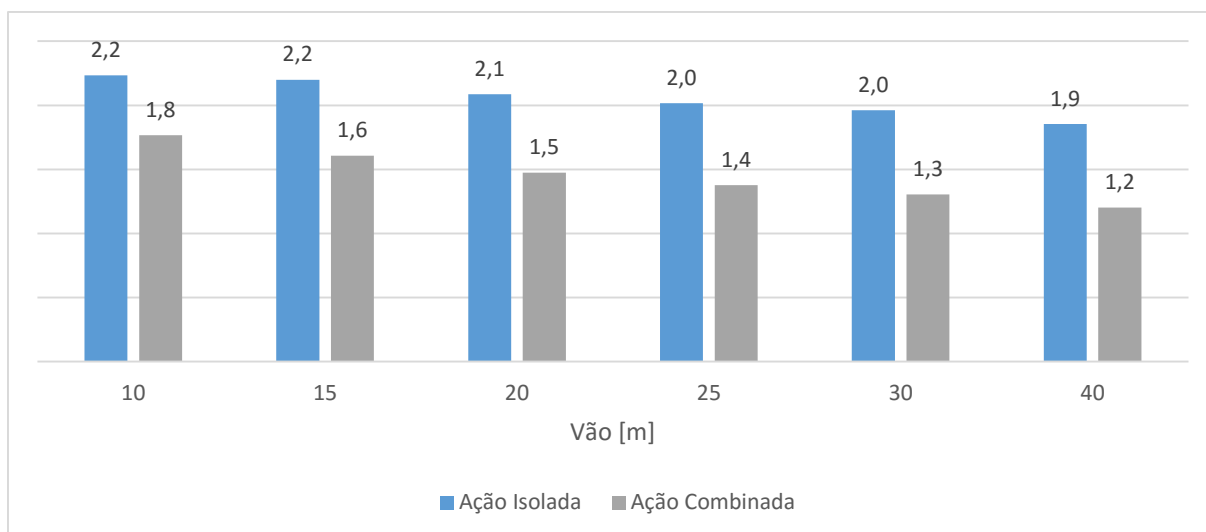


Fig. 4.16 – Rácio entre o momento fletor relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro vigado)

Como visto anteriormente, as diferenças são maiores quando se considera a ação isolada das cargas rodoviárias e atenuam-se com o crescimento do vão.

De forma semelhante, na Fig. 4.17 estão representados os rácios entre os esforços transversos provocados pela aplicação dos modelos de carga do EC1-2 e os que resultam da aplicação dos modelos de carga do RSA. Estes resultados são também apresentados tanto para a aplicação isolada das cargas rodoviárias como para a sua aplicação em combinação com o peso próprio estrutural.

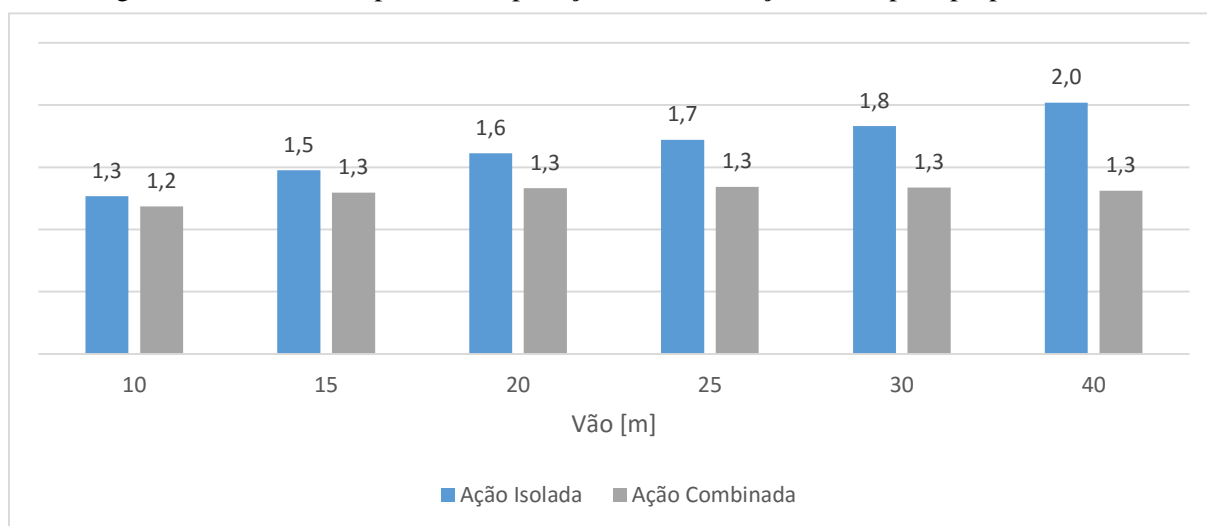


Fig. 4.17 – Rácio entre o esforço transversal relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro vigado)

4.4 TABULEIRO EM LAJE NERVURADA

4.4.1 ASPETOS GERAIS

A análise dos resultados do segundo caso de estudo não necessita de explicação tão detalhada, uma vez que não apresenta especial complexidade. A análise foi feita conforme descrito em 4.2.1 e os resultados serão expostos de acordo com o estipulado em 4.2.2.

Uma vez que estes modelos não incorporam qualquer elemento do tipo barra, todos os resultados são apresentados para os elementos finitos das malhas das lajes. A laje analisada foi a central, que representa a nervura. Os valores apresentados correspondem assim ao valor mais elevado de cada esforço para a laje central de cada modelo. Como foi referido, a análise é feita somente na direção longitudinal.

4.4.2 VÃO DE 10M

Na Tabela 4.15 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura de tabuleiro em laje nervurada com vão de 10m na direção longitudinal.

Tabela 4.15 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m/m]	Fv [kN/m]
RSA (Português)	Peso Próprio	260	220
	Veículo	267	173
	Carga Uniforme + Carga de Faca	344	243
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	234	202
	Load Model 1	731	604
	Load Model 2	252	171
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	217	185
	Tandem	387	235
	Camião	362	222
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	225	191
	Sobrecarga	430	220
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	208	180
	NA(1) + NA(2)	469	378
	NA(3)	122	80
	NB36	262	148
	NC	194	96
SNiP (Russo)	Peso Próprio	191	162
	AK	290	173
	HK-80	246	167
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	234	202
	Load Model 1	604	500
	Load Model 2	204	138
IRC (Indiano)	Peso Próprio	234	199
	Class 70R	290	154
	Class A	464	343
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	217	187
	Tandem	378	252
	Camião	348	314
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	208	177
	Camião	283	192
	Camião + Carga Uniforme	274	172

Na Fig. 4.18 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

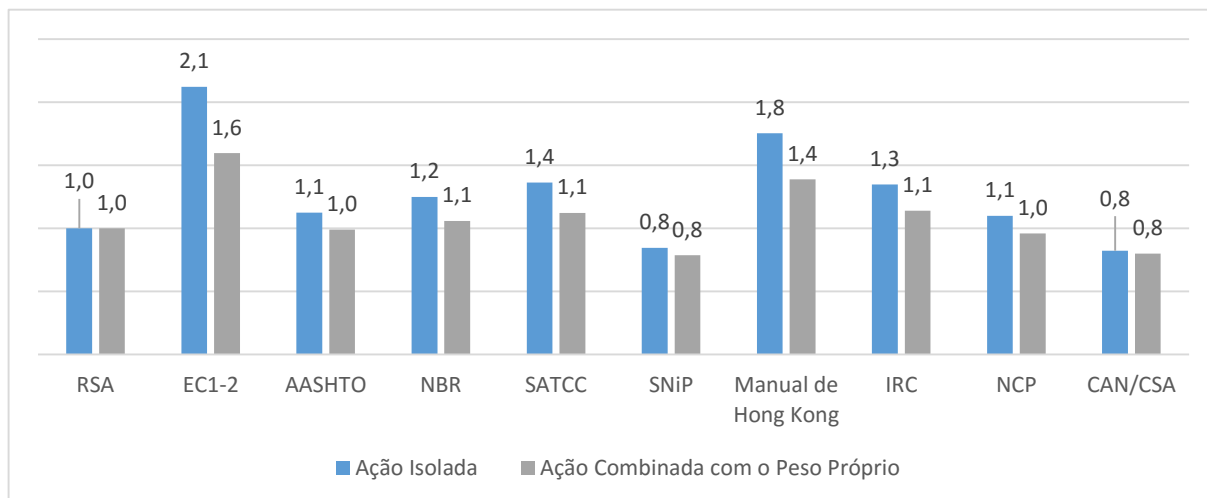


Fig. 4.18 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m)

O regulamento cujas ações provocam momentos mais severos é o EC1-2 – 2,12 vezes superiores aos provocados pela aplicação do RSA quanto à ação isolada e 1,6 vezes quanto à ação combinada com o peso próprio. Pelo contrário, a norma russa provoca os momentos mais reduzidos tanto pela aplicação isolada da carga rodoviária (84% dos valores do RSA) como pela aplicação da carga rodoviária em combinação com o peso próprio (79% dos valores do RSA).

De forma análoga, na Fig. 4.19 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

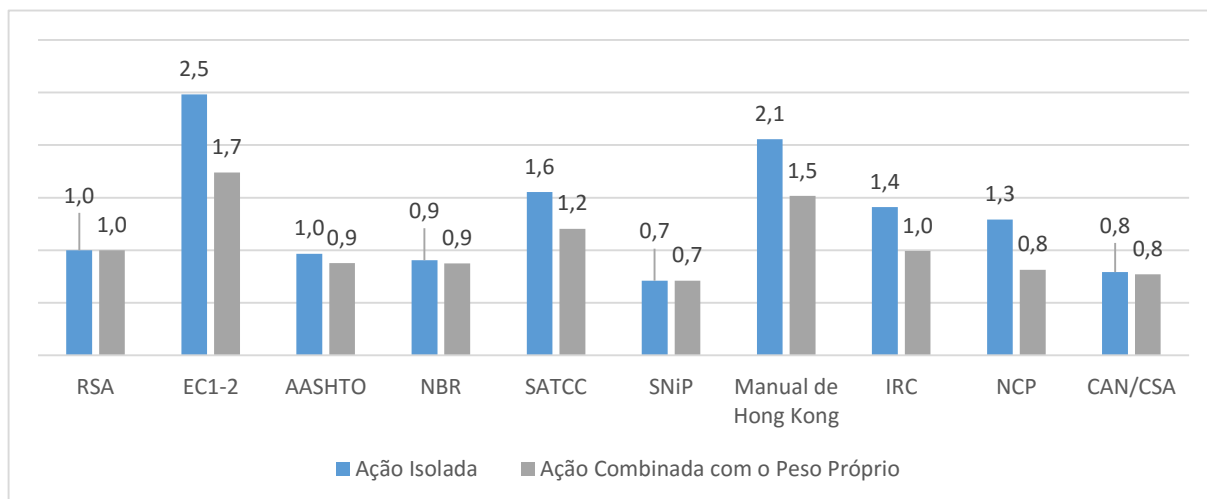


Fig. 4.19 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 10m)

Também no que diz respeito ao esforço transversal, os resultados relativos ao EC1-2 são os mais condicionantes – 2,5 vezes em relação ao RSA para a ação isolada e 1,7 vezes para a ação combinada com o peso próprio – e os valores do SNiP são os mais reduzidos – 0,7 vezes em relação ao RSA nas duas situações.

4.4.3 VÃO DE 15M

Na Tabela 4.16 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura de tabuleiro em laje nervurada com vão de 15m na direção longitudinal.

Tabela 4.16 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m/m]	Fv [kN/m]
RSA (Português)	Peso Próprio	849	512
	Veículo	407	232
	Carga Uniforme + Carga de Faca	643	378
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	764	467
	Load Model 1	1299	944
	Load Model 2	391	176
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	708	427
	Tandem	710	357
	Camião	767	423
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	736	444
	Sobrecarga	888	419
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	679	415
	NA(1) + NA(2)	935	660
	NA(3)	205	118
	NB36	514	197
	NC	415	144
SNiP (Russo)	Peso Próprio	623	376
	AK	517	274
	HK-80	440	183
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	764	467
	Load Model 1	1006	754
	Load Model 2	317	143
IRC (Indiano)	Peso Próprio	764	461
	Class 70R	511	169
	Class A	916	522
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	708	428
	Tandem	633	273
	Camião	694	338
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	680	410
	Camião	581	353
	Camião + Carga Uniforme	585	344

Na Fig. 4.20 exibe-se um gráfico de barras representando a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

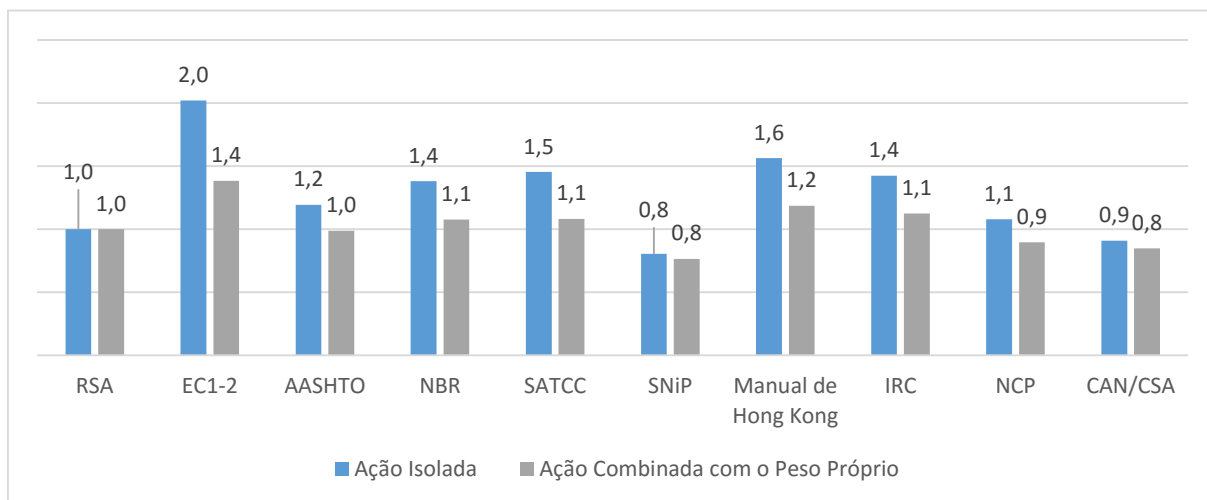


Fig. 4.20 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m)

Os momentos mais elevados surgem com a aplicação do EC1-2 – 2,0 vezes os valores do RSA sem considerar o peso próprio e 1,4 vezes levando-o em conta – enquanto que os mais reduzidos surgem da aplicação da norma SNiP – 0,80 vezes não tendo em conta o peso próprio e 0,80 vezes considerando essa ação.

De forma análoga, na Fig. 4.21 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

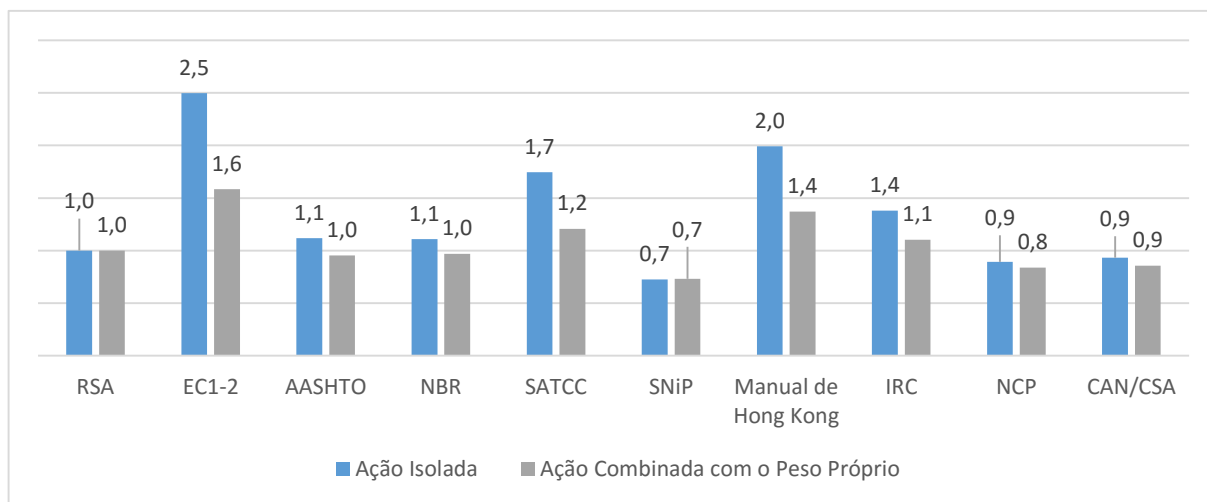


Fig. 4.21 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 15m)

A aplicação das cargas rodoviárias estabelecidas no EC1-2 provoca momentos 2,5 vezes superiores aos decorrentes da aplicação das ações do RSA quando as cargas rodoviárias são aplicadas isoladamente e 1,6 vezes superiores às cargas correspondentes ao RSA quando se tem em conta a ação do peso próprio.

A aplicação das ações do SNIp provoca momentos de 30% inferiores aos do RSA, considerando ou não a ação do peso próprio. Estes são, respetivamente os regulamentos mais e menos severos.

4.4.4 VÃO DE 20M

Na Tabela 4.17 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura de tabuleiro em laje nervurada com vão de 20m na direção longitudinal.

Tabela 4.17 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m/m]	Fv [kN/m]
RSA (Português)	Peso Próprio	2027	830
	Veículo	708	213
	Carga Uniforme + Carga de Faca	1025	436
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	1824	753
	Load Model 1	1990	1062
	Load Model 2	660	706
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	1689	693
	Tandem	1110	430
	Camião	1271	532
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	1757	719
	Sobrecarga	1490	528
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	1621	669
	NA(1) + NA(2)	1670	812
	NA(3)	274	97
	NB36	898	284
	NC	670	191
SNIp (Russo)	Peso Próprio	1486	610
	AK	786	328
	HK-80	174	75
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	1824	753
	Load Model 1	1926	1023
	Load Model 2	469	215
IRC (Indiano)	Peso Próprio	1824	749
	Class 70R	758	203
	Class A	1540	708
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	1689	694
	Tandem	930	317
	Camião	1100	413
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	1621	666
	Camião	1017	504
	Camião + Carga Uniforme	1041	490

Na Fig. 4.22 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

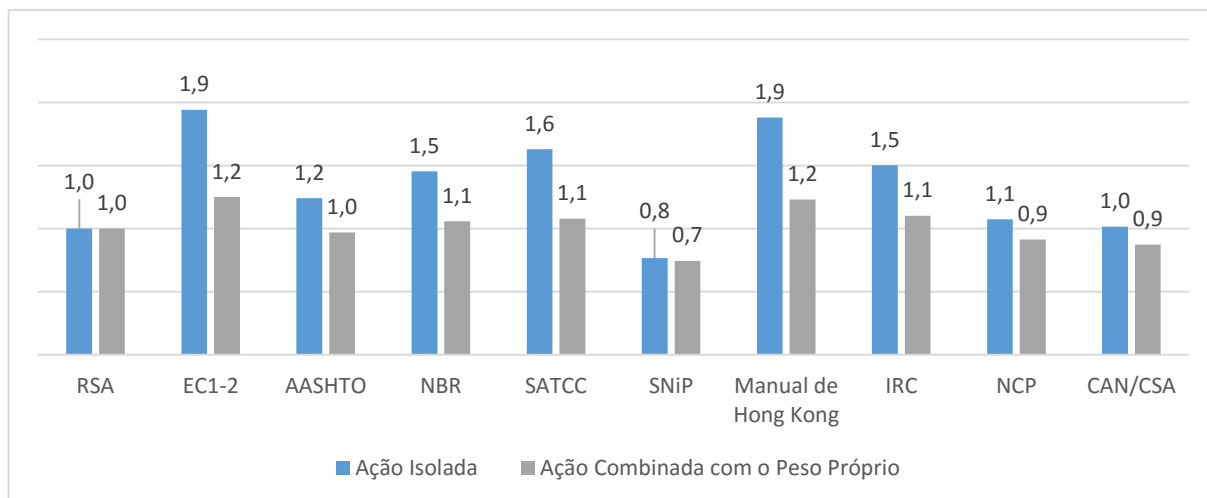


Fig. 4.22 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m)

Analisando a aplicação isolada das cargas rodoviárias, os momentos mais significativos decorrem da aplicação do EC1-2 e do Manual de Hong Kong (90% superiores aos do RSA) e os mais diminutos surgem da aplicação da norma russa (20% inferiores aos do RSA). Quanto à aplicação combinada das cargas rodoviárias com o peso próprio, os regulamentos mais severos são novamente o EC1-2 e o Manual de Hong Kong, onde os efeitos são 20% superiores aos do RSA e o menos condicionante é novamente a norma SNiP (efeitos 30% inferiores aos do RSA).

De forma análoga, na Fig. 4.23 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

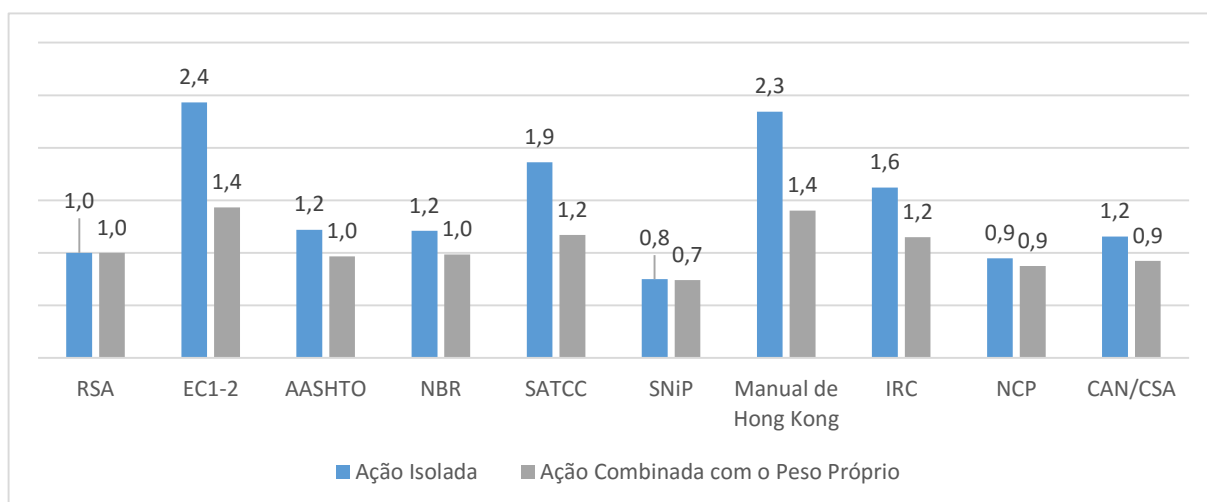


Fig. 4.23 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 20m)

Analisando este gráfico observa-se que os esforços transversos mais elevados surgem, para este vão com a aplicação do EC1-2 – 2,4 vezes os efeitos do RSA para a ação isolada e 1,4 vezes para a ação

combinada do peso próprio – e os mais reduzidos decorrem da ação das cargas previstas na norma SNiP – 0,8 vezes os efeitos do RSA para a ação isolada e 0,7 considerando a ação do peso próprio.

4.4.5 VÃO DE 25M

Na Tabela 4.18 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura de tabuleiro em laje nervurada com vão de 25m na direção longitudinal.

Tabela 4.18 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m/m]	Fv [kN/m]
RSA (Português)	Peso Próprio	3908	1160
	Veículo	915	214
	Carga Uniforme + Carga de Faca	1464	474
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	3517	1053
	Load Model 1	2754	1129
	Load Model 2	702	242
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	3256	967
	Tandem	1528	488
	Camião	1786	598
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	3387	1006
	Sobrecarga	2169	597
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	3126	936
	NA(1) + NA(2)	2429	888
	NA(3)	354	133
	NB36	1301	324
	NC	1301	324
SNiP (Russo)	Peso Próprio	2866	851
	AK	1057	381
	HK-80	865	207
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	3517	1053
	Load Model 1	2661	1084
	Load Model 2	568	196
IRC (Indiano)	Peso Próprio	3517	1045
	Class 70R	1011	219
	Class A	2244	835
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	3256	968
	Tandem	1211	334
	Camião	1491	447
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	3126	929
	Camião	1532	587
	Camião + Carga Uniforme	1594	575

Na Fig. 4.24 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

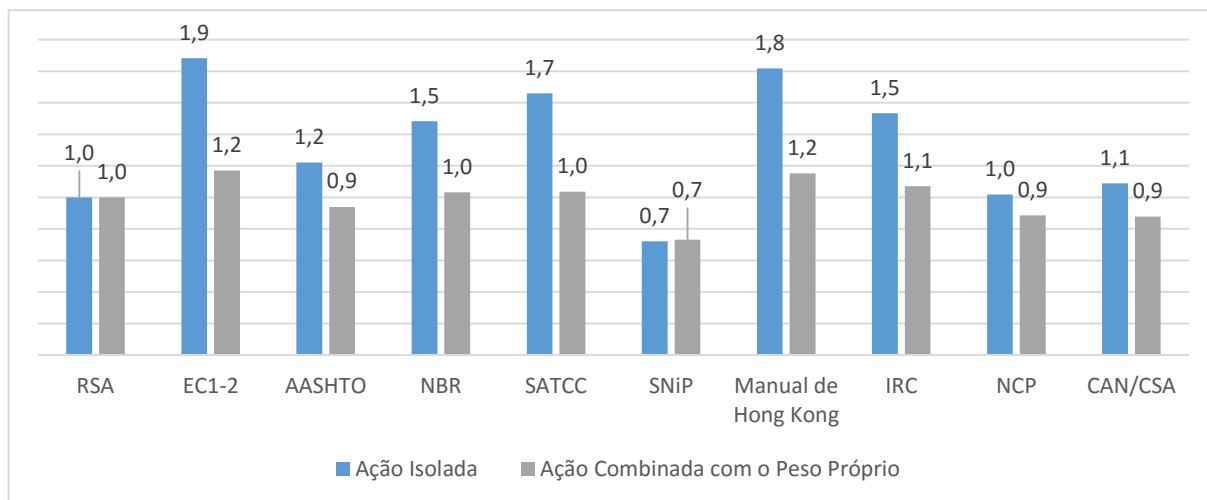


Fig. 4.24 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m)

O EC1-2 provoca momentos 1,9 vezes superiores aos do RSA quando a carga rodoviária é aplicada isoladamente, sendo o regulamento mais conservativo nesta análise. No entanto, considerando a ação conjunta do peso próprio, o valor do momento fletor provocado pela aplicação das cargas rodoviárias prescritas neste regulamento é apenas 1,2 vezes superior aos valores relativos ao RSA, ficando ao mesmo nível que o Manual de Hong Kong. O regulamento com efeitos mais reduzidos é, mais uma vez, a norma SNiP – 30% inferior ao momento do RSA para a ação isolada e 30% inferior ao momento do RSA considerando o peso próprio.

De forma análoga, na Fig. 4.25 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

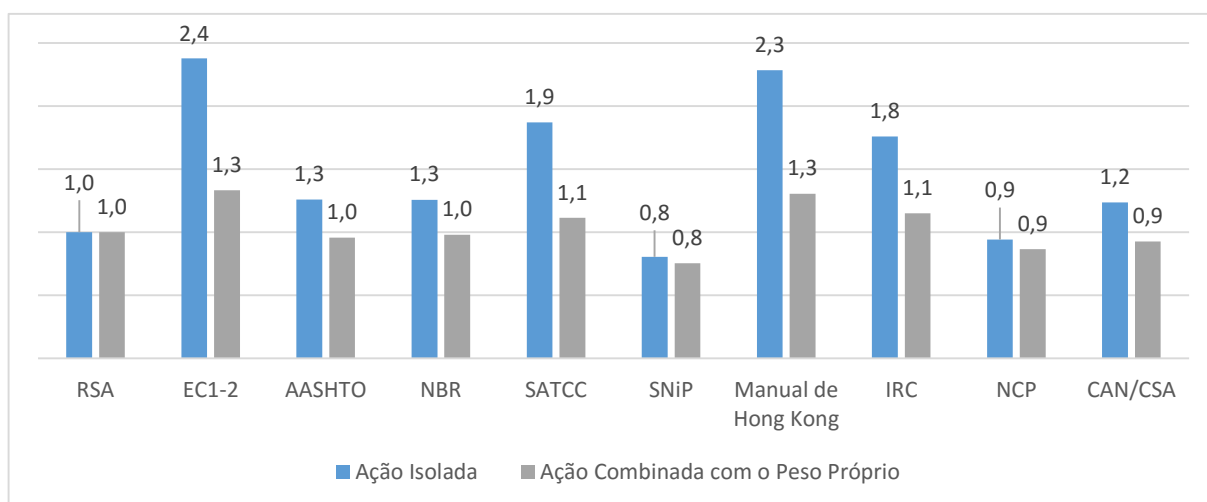


Fig. 4.25 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 25m)

No que diz respeito aos esforços transversos a análise é semelhante à realizada para os momentos fletores. Apesar de o EC2-1 provocar esforços 2,4 vezes superiores aos do RSA quando a carga

rodoviária é aplicada isoladamente – fazendo deste o regulamento com efeitos mais gravosos nesta situação – considerando a ação conjunta do peso próprio, o valor do esforço transversal provocado pela aplicação das cargas rodoviárias prescritas neste regulamento é apenas 1,3 vezes superior aos valores relativos ao RSA, ficando novamente ao nível do Manual de Hong Kong (1,3 vezes os valores do RSA). O regulamento com efeitos mais reduzidos é de novo a norma SNiP – 20% inferior ao momento do RSA para a ação isolada e 20% inferior ao momento do RSA considerando o peso próprio.

4.4.6 VÃO DE 30M

Na Tabela 4.19 apresentam-se os valores dos esforços na estrutura de tabuleiro em laje nervurada com vão de 30m na direção longitudinal.

Tabela 4.19 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m)

Regulamento / Norma / Manual	Caso de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m/m]	Fv [kN/m]
RSA (Português)	Peso Próprio	7094	1580
	Veículo	1267	241
	Carga Uniforme + Carga de Faca	2189	544
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	6384	1418
	Load Model 1	4010	1295
	Load Model 2	434	99
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	5911	1314
	Tandem	1549	618
	Camião	2639	753
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	6148	1367
	Sobrecarga	3292	756
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	5675	1260
	NA(1) + NA(2)	3598	1050
	NA(3)	475	131
	NB36	1906	413
	NC	1906	413
SNiP (Russo)	Peso Próprio	5202	1157
	AK	1482	450
	HK-80	1195	242
Manual de Hong Kong	Peso Próprio	6384	1418
	Load Model 1	3866	1238
	Load Model 2	755	177
IRC (Indiano)	Peso Próprio	6384	1420
	Class 70R	1402	273
	Class A	3376	1026
NCP (Colombiano)	Peso Próprio	5911	1315
	Tandem	1690	529
	Camião	2147	711
CAN/CSA (Canadiano)	Peso Próprio	5675	1262
	Camião	2338	744
	Camião + Carga Uniforme	2475	740

Na Fig. 4.26 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

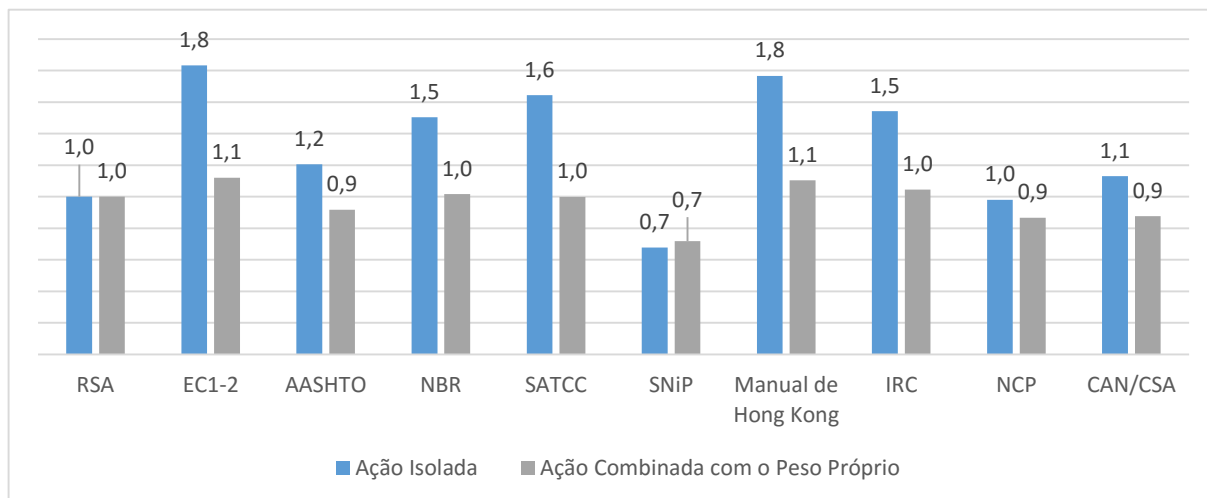


Fig. 4.26 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m)

Como se pode observar da figura, mais uma vez o EC1-2 e o Manual de Hong Kong provocam os momentos mais elevados quando se põe de parte a ação do peso próprio (1,8 vezes em relação ao momento do RSA). Na situação de consideração do peso próprio na análise os dois códigos anteriores são novamente os mais penalizadores com um acréscimo de 10% em relação ao RSA. O regulamento mais brando nesta situação continua a ser o russo – 0,7 vezes os efeitos do RSA sem considerar o peso próprio e 0,7 levando-o em conta.

De forma análoga, na Fig. 4.27 apresentam-se os valores do esforço transversal máximo de cada regulamento em relação ao RSA.

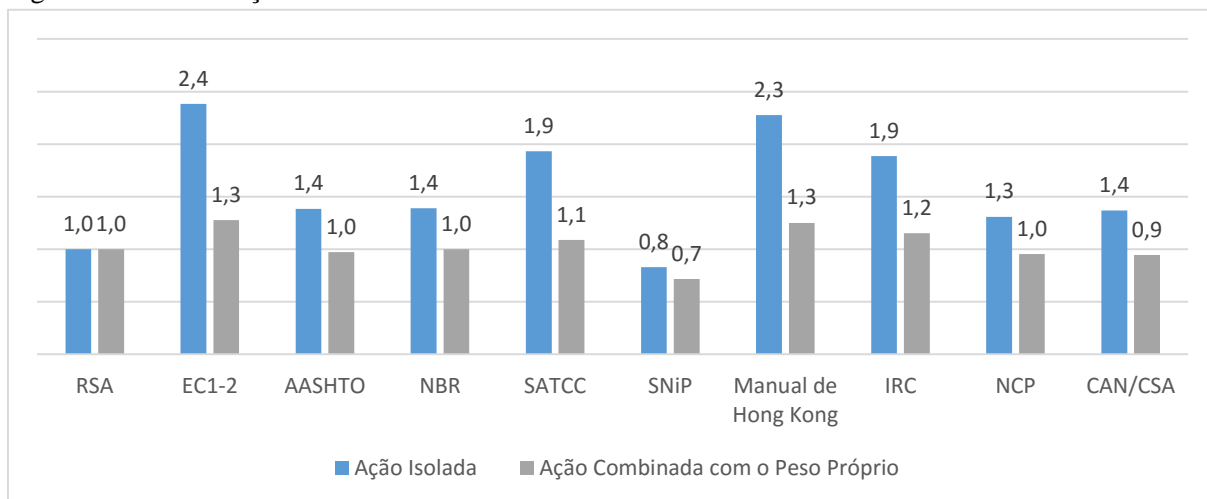


Fig. 4.27 – Rácio do esforço transversal máximo em relação ao RSA (tabuleiro em laje nervurada, vão de 30m)

Observando a figura é de notar a preponderância do EC1-2 em relação aos restantes – efeitos 2,4 vezes superiores aos do RSA para a ação isolada e 1,3 vezes considerando o peso próprio. Observa-se também que a norma russa é que provoca esforços transversos mais reduzidos – 20% inferiores aos do RSA desprezando a ação do peso próprio e 30% inferiores, tendo em conta essa ação.

4.4.7 COMPARAÇÃO GLOBAL

4.4.7.1 MOMENTO FLETOR

Tal como foi feito em 4.3.8.1, apresenta-se o gráfico da Fig. 4.28, que consiste numa representação tridimensional que engloba os resultados relativos a todos os regulamentos estudados representando a evolução dos momentos fletores (em valor absoluto) na estrutura em função do vão. Na sua sequência, apresenta-se a Tabela 4.20Tabela 4.13, onde se expõem os rácios entre o valor do momento decorrente da aplicação de cada regulamento em relação ao RSA, para cada vão. Estes valores dizem respeito à ação rodoviária combinada com o peso próprio.

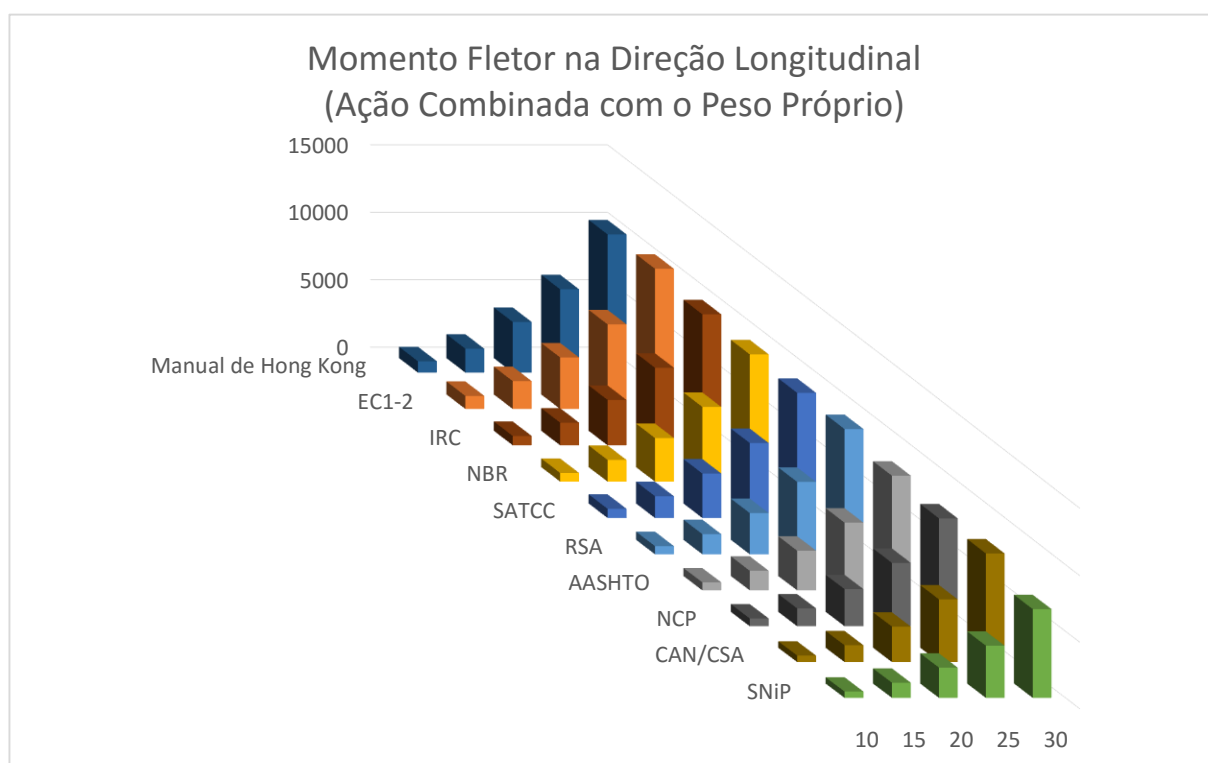


Fig. 4.28 – Representação tridimensional do momento fletor na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)

Tabela 4.20 – Rácio entre o momento fletor na estrutura para cada regulamento em relação ao RSA e em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)

Regulamento \ Vão	10	15	20	25	30
SNiP (Russo)	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
CAN/CSA (Canadiano)	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
NCP (Colombiano)	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
AASHTO (Americano)	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
RSA (Português)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SATCC (Sul-Africano)	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
NBR (Brasileiro)	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
IRC (Indiano)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
EC1-2 (Europeu)	1,6	1,4	1,2	1,2	1,1
Manual de Hong Kong	1,4	1,2	1,2	1,2	1,1

Importa apontar as diferenças entre os resultados relativos ao RSA e os relativos ao EC1-2 que atingem, para o vão de 10m diferenças de 60%, sendo esta a maior diferença face aos valores do RSA. É ainda de notar que as diferenças se vão esbatendo com a evolução do vão, por exemplo, para o vão de 10m sujeito à ação das cargas do EC1-2, obtêm-se momentos 60% superiores aos do RSA, enquanto que, aplicando o mesmo regulamento ao vão de 40m, as diferenças em relação aos resultados do RSA são de apenas 10%.

É ainda de notar que a aplicação, tanto da norma brasileira como do código Sul-Africano – provavelmente os dois regulamentos com maior interesse para a engenharia portuguesa, excluindo, obviamente, o RSA e o EC1-2 – dá origem a resultados próximos dos relativos à aplicação do RSA (não diferem mais de 10% para esta tipologia de tabuleiro).

4.4.7.2 ESFORÇO TRANSVERSO

De forma análoga ao que se apresentou no ponto anterior e em 4.3.8, o gráfico da FIG consiste numa representação tridimensional que engloba os resultados relativos a todos os regulamentos estudados representando a evolução dos esforços transversos (em valor absoluto) na estrutura em função do vão. Na sua sequência, apresenta-se a TABELA, onde se expõem os rácios entre o valor do esforço transversal decorrente da aplicação de cada regulamento em relação ao RSA, para cada vão. Estes valores dizem também respeito à ação rodoviária combinada com o peso próprio.

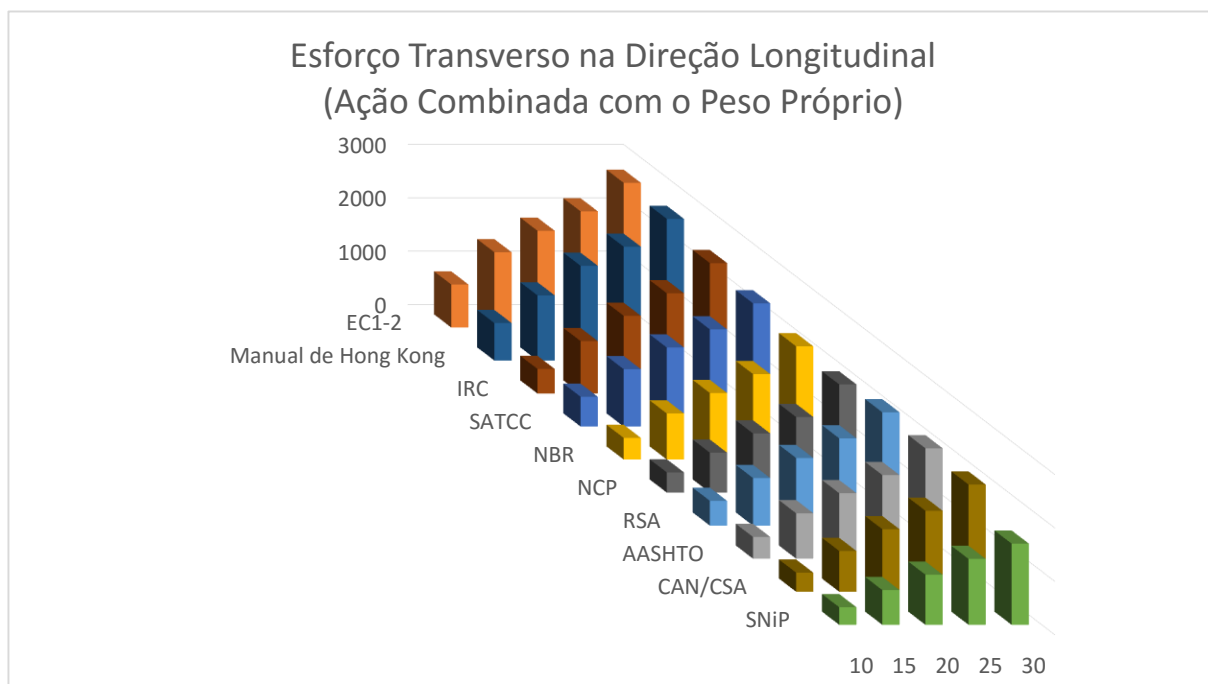


Fig. 4.29 – Representação tridimensional do esforço transverso na estrutura para cada regulamento em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)

Tabela 4.21 – Rácio entre o esforço transverso na estrutura para cada regulamento em relação aorsa e em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)

Vão \ Regulamento	10	15	20	25	30
SNiP (Russo)	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7
CAN/CSA (Canadiano)	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
AASHTO (Americano)	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
RSA (Português)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
NCP (Colombiano)	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
NBR (Brasileiro)	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
SATCC (Sul-Africano)	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
IRC (Indiano)	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2
Manual de Hong Kong	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3
EC1-2 (Europeu)	1,7	1,6	1,4	1,3	1,3

Importa aqui apontar as diferenças entre os resultados relativos ao RSA e os relativos ao EC1-2 que atingem, para o vão de 10m diferenças de 70%. É ainda de notar que as diferenças se vão atenuando com a evolução do vão, por exemplo, para os mesmos regulamentos, a diferença entre os resultados para o vão de 40m é de apenas 30%.

4.4.8 COMPARAÇÃO ENTRE RSA E EC1-2

De forma análoga ao que foi feito em 4.3.9, apresenta-se a Fig. 4.30, onde estão representados os rácios entre os momentos fletores provocados pela aplicação dos modelos de carga do EC1-2 e os que resultam da aplicação dos modelos de carga do RSA.

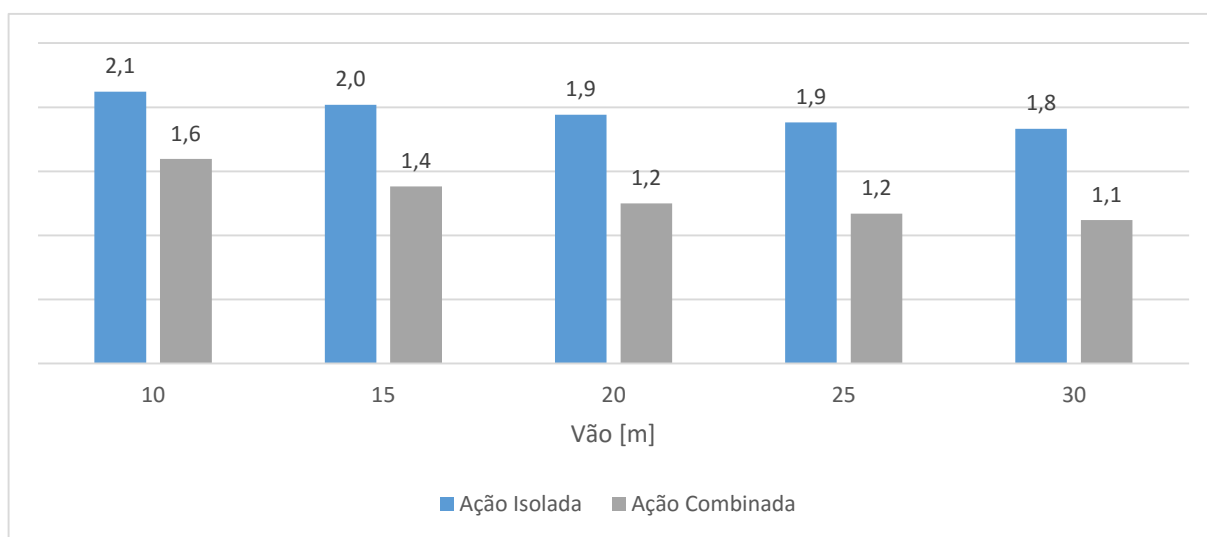
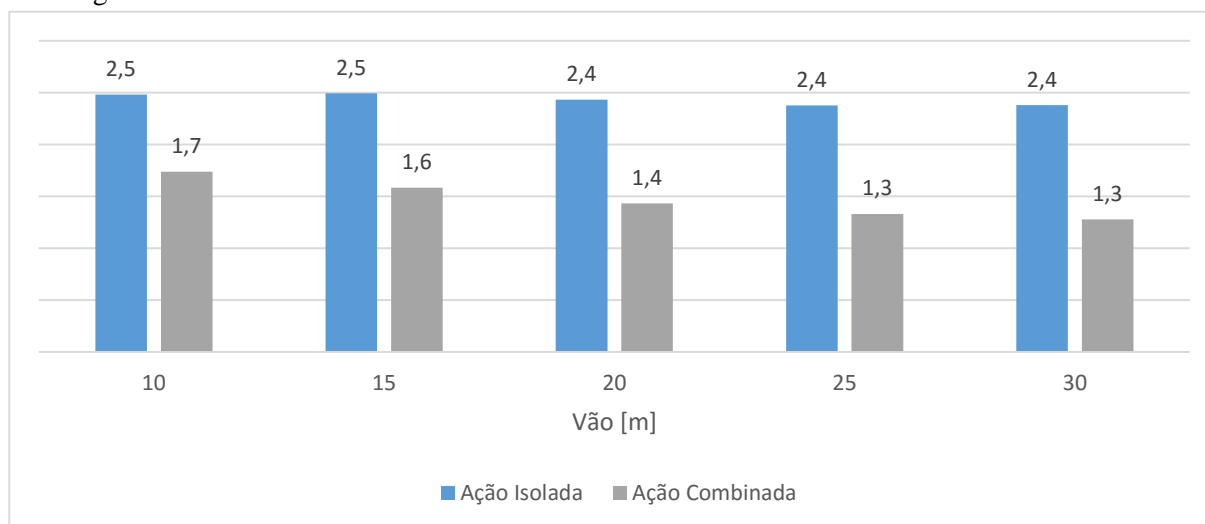


Fig. 4.30 – Rácio entre o momento fletor relativo ao EC1-2 e o relativo ao RSA em função do vão (tabuleiro em laje nervurada)

Ao contrário do que acontecia no primeiro caso de estudo, os valores relativos ao vão de 15m enquadram-se nos restantes.

De forma semelhante, na Fig. 4.17 estão representados os rácios entre os esforços transversos provocados pela aplicação dos modelos de carga do EC1-2 e os que resultam da aplicação dos modelos de carga do RSA.



4.5 CONCLUSÕES

Como é possível verificar, os efeitos nas estruturas decorrentes da aplicação dos vários regulamentos são muito diversificados. Salientam-se o EC1-2, o Manual de Hong Kong e a norma do IRC como aqueles que, de forma geral, conduzem a resultados mais desfavoráveis e a norma russa como aquela em que, quase sempre, se verificam os esforços menos gravosos.

É possível também verificar que o peso próprio tem uma grande influência nos esforços finais nas estruturas. Na maioria dos casos este mitiga as diferenças entre os regulamentos. Por exemplo, no caso do modelo de tabuleiro em laje nervurada com 40m de vão calculado pelo EC1-2, a aplicação das ações rodoviárias de forma isolada provoca esforços transversos na estrutura de valor 2,4 vezes superior ao relativo ao RSA, enquanto que a aplicação das ações rodoviárias combinadas com o peso próprio provoca esforços transversos cerca de 30% superiores aos correspondentes à aplicação do RSA. Verifica-se neste caso uma diferença de 110 pontos percentuais.

Por outro lado, existem também os casos em que, devido às diferenças entre coeficientes parciais de segurança, aliados às diferenças entre cargas, a consideração do peso próprio aumenta as disparidades entre os efeitos da aplicação das cargas regulamentares. No caso do modelo de tabuleiro de vigas pré-fabricadas com 10m de vão sujeito à aplicação das cargas prescritas pela norma russa, a aplicação da carga de forma isolada provoca momentos aproximadamente iguais aos valores análogos para o RSA. Por outro lado, a aplicação do peso próprio combinado com as restantes ações consideradas provoca momentos cerca de 10% inferiores aos valores correspondentes à aplicação das cargas de acordo com o RSA. Ainda assim, este fenómeno ocorre de forma mais esporádica que o seu contrário e, como se pode verificar, nos casos em que ocorre, a sua intensidade é muito menor do que a do fenómeno oposto.

Importa ainda salientar que as diferenças entre os efeitos da aplicação dos diversos regulamentos, por norma, se vão atenuando com o crescimento do vão, sendo que esse fenómeno de atenuação é consideravelmente mais significativo quando se tem em conta a ação do peso próprio.

5

CASO PRÁTICO

5.1 INTRODUÇÃO

O estudo de um caso prático surge como conclusão do trabalho desenvolvido anteriormente. Pretende-se utilizar uma estrutura real projetada pela CCAD para averiguar a validade das conclusões retiradas dos casos de estudo para casos concretos de engenharia de pontes. Este capítulo surge também com o objetivo de possibilitar uma análise comparativa, para um caso concreto, das consequências práticas de considerar diferentes regulamentos no dimensionamento de obras de arte.

Foi tomada a opção de condensar a regulamentação utilizada nesta análise, no sentido de observar com mais detalhe os efeitos dos regulamentos, códigos e normas que mais interesse têm no contexto da engenharia de estruturas portuguesa. Desta forma, decidiu-se considerar nesta análise apenas metade dos regulamentos ponderados inicialmente, a saber:

- Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes – Portugal. É o regulamento atualmente em vigor em Portugal e, por esse motivo, aquele foi considerado como base de comparação.
- Eurocódigo 1, Parte 2. Num futuro próximo será, em princípio, obrigatório tanto a nível nacional como europeu, sendo já a base de ensino em disciplinas de muitas universidades europeias, nomeadamente na Unidade Curricular de Estruturas de Betão do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* – Estados Unidos. Não sendo de uso corrente em Portugal, é uma referência a nível mundial, servindo de base a outros regulamentos – caso da Norma Colombiana, como se viu – ou de regulamento a adotar no caso da inexistência de normas específicas num determinado país.
- SATCC *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts* – África Austral. É o regulamento utilizado em países como Angola e Moçambique, com grande importância para as empresas de engenharia civil portuguesa.
- Norma Brasileira ABNT NBR 7188 – Brasil. Assume também relevância, devido ao volume de negócios associado a projetos de empresas portuguesas realizados para o Brasil.

Após uma descrição da estrutura será apresentada a comparação entre os efeitos decorrentes da aplicação dos modelos de carga de cada regulamento.

5.2 DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

O caso prático discutido neste capítulo é exibido na Fig. 5.1 e diz respeito a uma passagem superior (PS10) inserida no projeto do lanço “Avelar Sul – Avelar Norte” do “IC3 – Tomar/Coimbra”, integrado na designada Subconcessão do Pinhal Interior. A obra de arte situa-se no concelho de Penela, distrito de Coimbra pertencente à província da Beira Litoral e permite a ligação entre as localidades de Grocinas e Farelo.



Fig. 5.1 – PS10 do lanço “Avelar Sul – Avelar Norte” do “IC3 – Tomar / Coimbra”

O tabuleiro é constituído por três tramos com uma extensão total de 54,80m. O tramo central tem 27,40m de comprimento, enquanto que o comprimento de cada um dos vãos extremos é de 13,70m. Na zona em que esta se insere, o perfil da via de que faz parte a passagem superior é caracterizado em perfil por uma concordância convexa. Por este motivo, o encontro do lado de Farelo está a uma cota 3,50m superior à do encontro do lado de Gracinas, o que faz com que o tabuleiro seja longitudinalmente inclinado.

A estrutura porticada que constitui esta obra de betão armado pré-esforçado é composta por um tabuleiro contínuo, simplesmente apoiado nos encontros e ligado monoliticamente nos dois alinhamentos de pilares.

O tabuleiro, cuja secção transversal se apresenta na Fig. 5.2, é constituído por três vigas pré-fabricadas de betão armado com 1,30m de altura, pré-esforçadas longitudinalmente por aderência. A plataforma do tabuleiro é constituída por uma laje de betão armado com uma espessura mínima de 0,25m. A laje será betonada sobre pré-lajes colaborantes, pré-fabricadas, com 0,07m de espessura incluída nos 0,25m de espessura nominal da laje.

O perfil transversal da via é constituído por uma faixa de rodagem com duas vias com largura total de 5,50m no centro, ladeada por uma berma e um passeio de cada lado com largura de 0,50m e 1,20m, respetivamente. A largura total do tabuleiro é deste modo 8,90m.

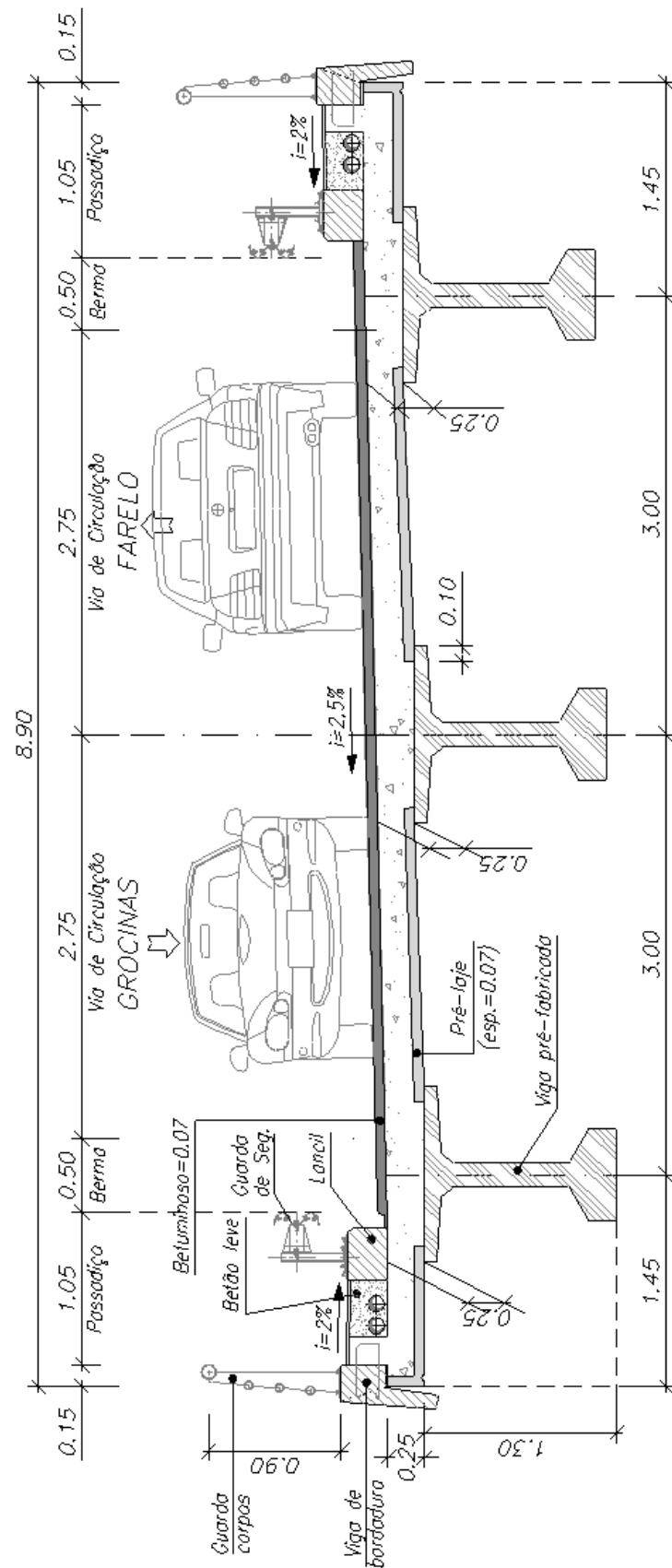


Fig. 5.2 – Perfil transversal da Passagem Superior PS10

A continuidade longitudinal do tabuleiro sobre os pilares é garantida através da betonagem *in situ* (2 fases de betonagem) de carlingas transversais de 0,80m de largura e através da colocação de armaduras ordinárias complementares na laje. De forma semelhante, a solidarização das vigas longitudinais pré-fabricadas sobre os encontros foi conseguida por meio de carlingas com uma largura de 0,80m e uma altura variável com mínimo de 1,75m.

Este caso prático surge assim no seguimento do primeiro caso de estudo: tabuleiro de vigas pré-fabricadas. As principais diferenças entre o caso prático e o caso de estudo são a largura do tabuleiro – 8,90m de largura da laje apoiada em três vigas principais no caso prático, contra 11,30m de largura da laje apoiada em 5 vigas no caso de estudo – o perfil longitudinal e os apoios – o caso de estudo tratava um único vão simplesmente apoiado, enquanto que o caso prático aborda um tabuleiro contínuo de três vãos, simplesmente apoiado nos encontros e ligado monoliticamente aos intermédios.

5.3 ANÁLISE DOS EFEITOS DAS AÇÕES REGULAMENTARES

A análise das ações é feita exclusivamente na direção longitudinal através da observação de diagramas de momentos e de esforço transversal. Esses diagramas são apresentados para cada um dos regulamentos analisados neste capítulo e, tal como acontecia com os resultados do caso de estudo (ver 4.3.1), dizem respeito à viga central. O estudo dedica-se unicamente ao vão central de 27,40m, uma vez que é este o vão condiciona o dimensionamento do tabuleiro.

5.3.1 ASPETOS GERAIS

De forma semelhante ao que foi realizado na análise ao primeiro caso de estudo, a análise do caso prático centrar-se-á, na direção longitudinal, nos esforços provocados na viga central do tramo central do tabuleiro. Tanto a metodologia de análise de dados como a disposição dos resultados são idênticas ao descrito em 4.2.

5.3.2 ANÁLISE COMPARATIVA

5.3.2.1 DIREÇÃO LONGITUDINAL

Na Tabela 5.1 são apresentados os momentos fletores e esforços transversos máximos na direção longitudinal do tabuleiro discriminando-os por regulamento e por caso de carga.

Tabela 5.1 – Esforços máximos na direção longitudinal por regulamento e por modelo de carga (PS10)

Regulamento / Norma / Manual	Modelo de Carga	Esforços Máximos	
		MI+ [kN.m]	Fv [kN]
RSA (Português)	Peso Próprio	1622	609
	Veículo	1309	525
	Carga Uniforme + Carga de Faca	1242	435
EC1-2 (Europeu)	Peso Próprio	1460	550
	Load Model 1	2867	1010
	Load Model 2	985	384
AASHTO (Americano)	Peso Próprio	1351	508
	Tandem	1942	686
	Camião	2075	791
NBR (Brasileiro)	Peso Próprio	1405	528
	Sobrecarga	2312	920
SATCC (Sul-Africano)	Peso Próprio	1297	487
	NA(1) + NA(2)	1933	720
	NA(3)	552	273
	NB36	1560	742
	NC	1226	535

Na Fig. 5.3 apresenta-se a relação entre os momentos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

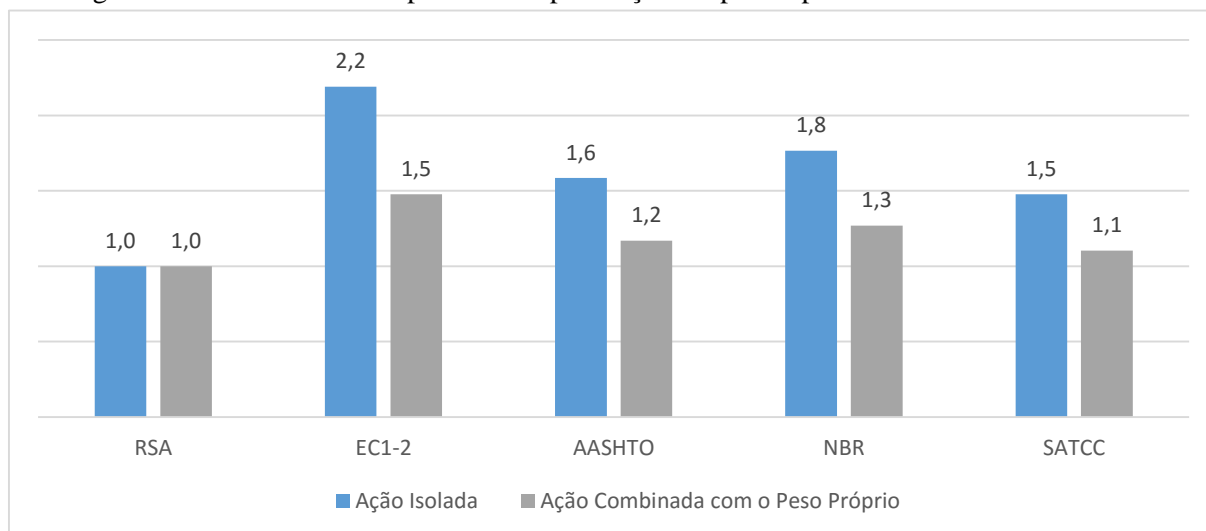


Fig. 5.3 – Rácio do momento fletor máximo em relação ao RSA (PS10)

Como se pode observar, os esforços mais elevados são consequência da aplicação do EC1-2 – 2,2 vezes os valores do RSA, para a aplicação isolada das cargas rodoviárias e 1,5 vezes para a aplicação combinada com o peso próprio – enquanto que os momentos mais reduzidos surgem na sequência da aplicação do regulamento base, o RSA.

De forma análoga, na Fig. 5.4 apresentam-se os esforços transversos máximos na direção longitudinal provocados pelas ações de cada regulamento e os momentos provocados pelas ações impostas pelo RSA.

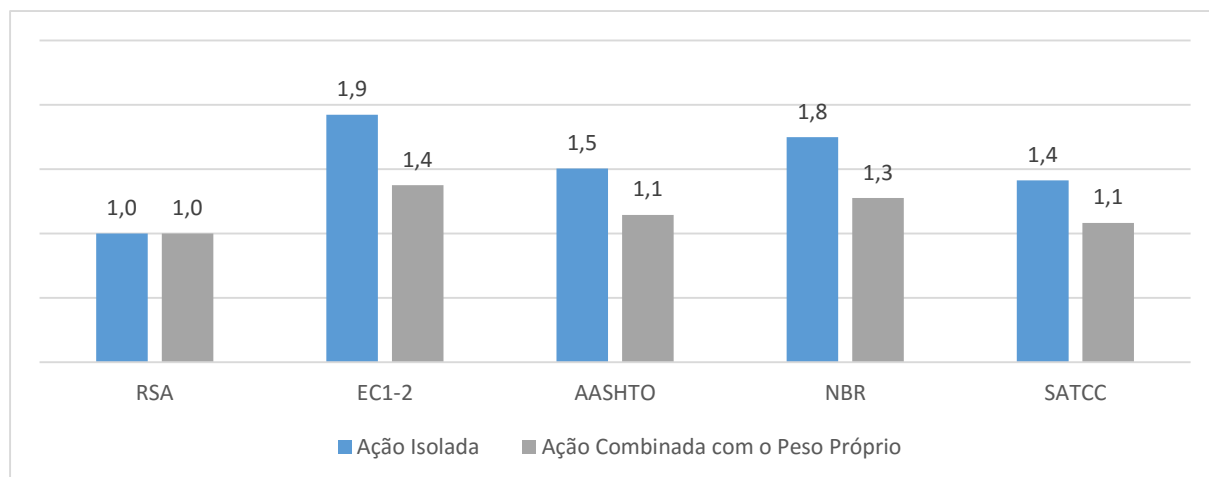


Fig. 5.4 – Rácio do esforço transverso máximo em relação ao RSA (PS10)

Também neste caso, os esforços máximos são provocados pela aplicação das cargas prescritas no EC1-2 – 90% superiores aos do RSA ignorando a ação do peso próprio e 40% tendo em conta essa ação permanente – e os esforços mínimos decorrem da aplicação do RSA.

5.3.2.2 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 5.2 apresentam-se os momentos fletores máximos na direção longitudinal do tabuleiro do caso prático, discriminados por regulamento.

Tabela 5.2 – Momento fletor máximo positivo e negativo na direção transversal (PS10)

Regulamento / Norma / Manual	Esforços Máximos	
	Mt+ [kN.m]	Mt- [kN.m]
RSA (Português)	69,9	-68,8
EC1-2 (Europeu)	108,6	-90,0
AASHTO (Americano)	81,7	-65,6
NBR (Brasileiro)	81,8	-80,8
SATCC (Sul-Africano)	65,2	-66,7

Como se pode observar, os valores mais elevados surgem, mais uma vez da aplicação do EC1-2 – 108,6kNm positivos e 90kNm negativos. Já os regulamentos menos gravosos são o sul-africano no caso dos momentos positivos (65,2kNm) e o americano no caso dos momentos negativos (-65,6kNm).

5.3.3 COMPARAÇÃO COM O 1º CASO DE ESTUDO

No sentido de averiguar as diferenças entre a realidade simplificada que foi alvo de estudo nos capítulos 3 e 4, considerou-se pertinente apresentar gráficos onde se confrontam os resultados obtidos no primeiro caso de estudo com os obtidos no presente caso prático. Optou-se por comparar os resultados do caso prático com os resultados do caso de estudo para os vãos de 25m e 30m, por serem os mais próximos do comprimento do vão central da PS10. valores relativos. Assim, apresentam-se as FIGs onde estão representados respetivamente o momento fletor e o esforço transversal decorrentes da aplicação do EC1-2 em relação aos esforços resultantes da aplicação do RSA.

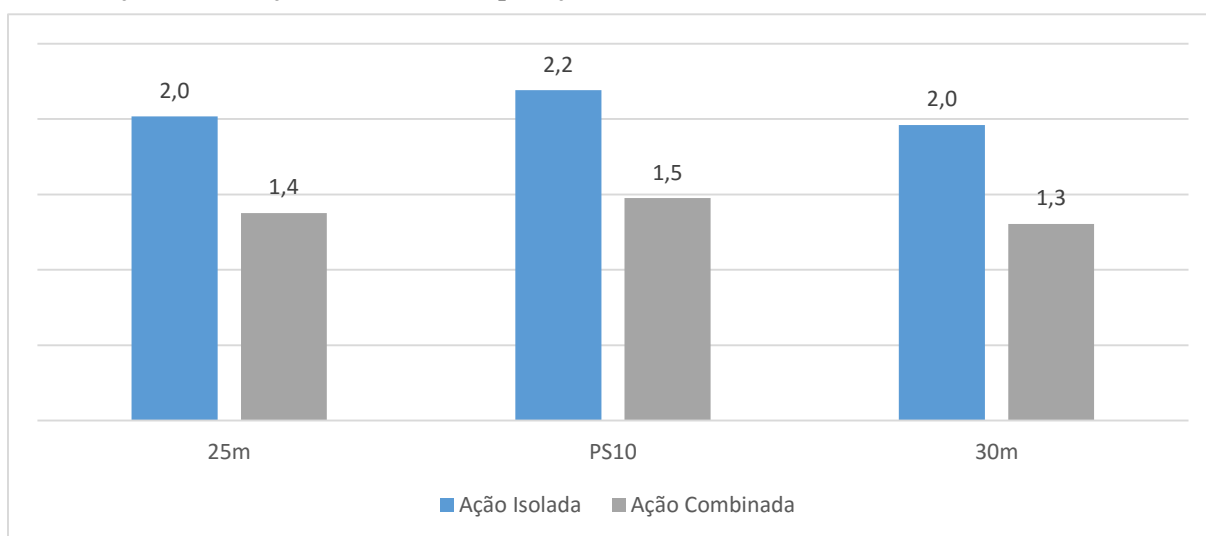


Fig. 5.5 – Rácios entre os momentos fletores relativos ao EC1-2 e os relativos ao RSA – Valores do 1º caso de estudo e do caso prático

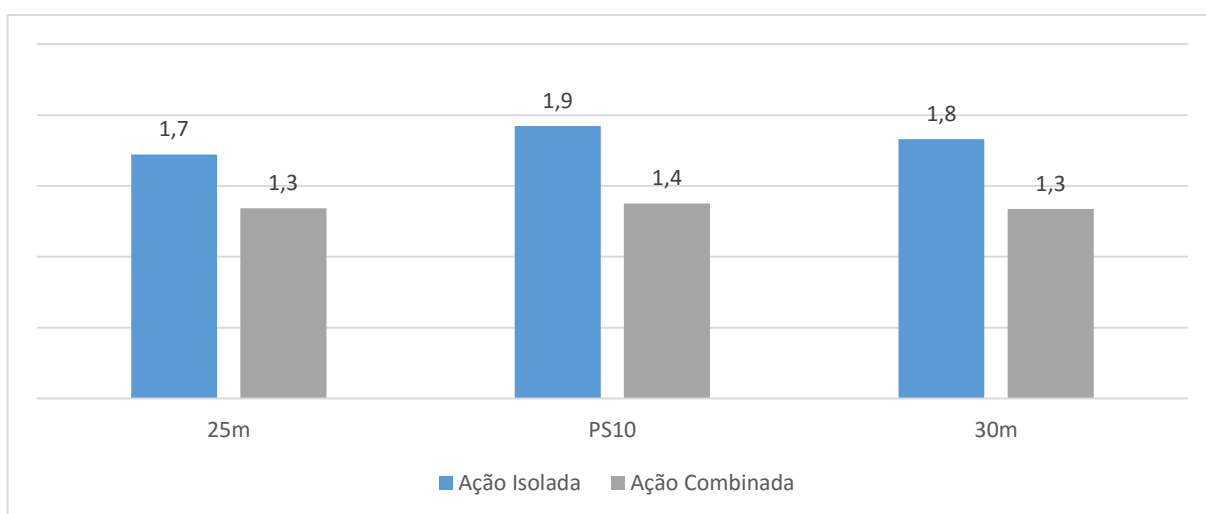


Fig. 5.6 – Rácios entre os esforços transversos relativos ao EC1-2 e os relativos ao RSA – Valores do 1º caso de estudo e do caso prático

Observa-se que os rácios relativos a ambos os esforços são mais elevados no caso prático do que no caso de estudo – cerca de 20 pontos percentuais para a ação isolada e 10 pontos percentuais quando se considera o peso próprio. Esta situação é, provavelmente, fruto de uma das diferenças entre as duas realidades, ou da conjugação de várias diferenças, por exemplo a secção transversal do tabuleiro, o sistema estrutural longitudinal, etc. Este fenómeno conduz a uma necessidade de ainda maior prudência na eventualidade da extrapolação das conclusões retiradas do Capítulo 4 para casos de tabuleiros contínuos, ainda que estas diferenças não sejam elevadas.

5.4 CONCLUSÕES

Analisando os valores obtidos, pode-se constatar que estes vão de encontro às conclusões retiradas dos casos de estudo, reforçando-as.

Os momentos fletores resultantes da aplicação isolada das cargas rodoviárias são até 119% superiores aos do RSA, enquanto que, considerando a ação do peso próprio, esta diferença é, no máximo de 38%. Ambos os valores são relativos ao Eurocódigo 1, Parte 2.

No que diz respeito aos esforços transversos, a realidade é ligeiramente diferente. Enquanto que, no caso da aplicação isolada das cargas rodoviárias, os efeitos resultantes são, no máximo 92% superiores aos do RSA, quando se tem em conta essa ação, a diferença nunca é superior a 38%. Esses valores também são relativos ao EC1-2.

Os momentos na direção transversal, neste caso, são de difícil comparação com os do caso de estudo, uma vez que a secção do tabuleiro é diferente: no caso de estudo utilizavam-se 5 vigas principais para suportar uma laje de 11,3m de largura enquanto que no caso prático se utilizam 3 vigas para suportar uma laje de 8,9m largura.

6

CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão da dissertação, apresentam-se de seguida algumas reflexões consideradas pertinentes e que de alguma forma espelham determinadas preocupações que acompanharam este trabalho, para além de resumirem as principais conclusões que dele se retiraram.

A diversa regulamentação analisada, com todas as diferenças que lhe são inerentes, baseia-se, de forma em geral, em princípios idênticos e utiliza ferramentas semelhantes. O principal reflexo das pequenas diferenças conceptuais constata-se na fase de modelação. A abordagem proposta pelos vários regulamentos resulta, não raras vezes, em dificuldades na modelação das ações. Estas diferenças não acarretam disparidades significativas ao nível dos esforços nas estruturas, sendo as diferenças quantitativas das cargas prescritas bastante mais relevantes neste aspeto do que as suas diferenças qualitativas ou conceptuais.

A planificação e execução dos modelos assume-se como aspeto fulcral num trabalho desta ordem. Não só é um fator fundamental para a eficácia do processo de modelação e de análise de dados, ajudando a reduzir o tempo despendido e o esforço de cálculo, como tem influência nos resultados finais e na forma como estes podem ser interpretados.

A utilização de regulamentos diferentes na definição das ações rodoviárias para um projeto de uma obra de arte conduz a esforços de valor profundamente diferente. Considerando, a título de exemplo, o caso do tabuleiro em laje nervurada com vão de 30m, o esforço transversal provocado pela aplicação das cargas prescritas na CAN/CSA-S6-06 provoca valores 174% superiores aos decorrentes da aplicação do RSA. Os valores dos esforços resultantes, regra geral, aproximam-se consideravelmente quando se tem em conta o peso próprio da estrutura.

De facto, a comparação entre os efeitos decorrentes da aplicação das ações rodoviárias pode ser abordada de duas perspetivas – com ou sem a consideração do peso próprio – conduzindo cada uma dessas aproximações a conclusões profundamente diferentes. O peso próprio contribui, na maioria das vezes, para aliviar as diferenças entre os efeitos da aplicação das ações de cada regulamento. Nos casos em que a sua consideração agrava essas diferenças, esse agravamento é reduzido. Com efeito, a diferença entre os esforços relativos decorrentes da aplicação isolada das ações rodoviárias e os que resultam da sua aplicação combinada com o peso próprio pode atingir valores muito acima dos 100 pontos percentuais – por exemplo, o esforço transversal máximo em relação ao RSA decorrente da aplicação das cargas prescritas na CAN/CSA-S6-06 no tabuleiro em laje nervurada com vão de 30m, varia de 2,74 no caso da aplicação isolada das ações rodoviárias para 1,3 quando é também considerada ação do peso próprio, o que constitui uma diferença de 144 pontos percentuais.

Tomando em conta o caso prático analisado observa-se que as diferenças entre os esforços resultantes da aplicação das cargas rodoviárias estabelecidas nos diversos regulamentos não se esbatem quando se passa para o âmbito das estruturas reais. Pelo contrário, e olhando particularmente para o caso do EC1-2, observa-se que essas diferenças tendem a agravar-se, ainda que a intensidade desse agravamento não seja elevada e que as suas causas não sejam claras.

O trabalho desenvolvido permitiu identificar diferenças muito relevantes em termos dos efeitos da ação rodoviária no dimensionamento do tabuleiro de obras de arte resultantes da aplicação dos regulamentos analisados. Estas diferenças assumem, nos casos dos regulamentos mais gravosos efeitos quase três vezes superiores aos do RSA. O estudo permitiu ainda verificar que estes efeitos são atenuados com a consideração conjunta da ação rodoviária e do peso próprio. Ainda assim, observam-se nestes casos diferenças na ordem dos 80%.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer da elaboração deste trabalho surgiram algumas questões que foram deixadas de fora do estudo, por se considerar que se encontravam fora do âmbito do trabalho. Algumas dessas questões podem motivar a elaboração de trabalhos no sentido de lhes dar resposta, enquanto que outras de menor complexidade seriam interessantes como complemento a publicações relacionadas com o tema. Seguem-se algumas sugestões de trabalhos passíveis de ser desenvolvidos no seguimento da presente dissertação:

- Análise comparativa dos efeitos das ações rodoviárias prescritas em regulamentação internacional quando aplicadas com valores característicos e da sua influência nas verificações em estados limite de serviço, ou nos valores de pré-esforço.
- Averiguação da correlação entre as cargas veiculares propostas pelos diversos regulamentos internacionais e o tráfego de veículos pesados nas estradas das zonas geográficas que estes tutelam, no sentido de avaliar a pertinência das diferenças entre regulamentos.
- Estudo dos efeitos da aplicação das cargas representativas de veículos de transporte especial segundo diferentes regulamentos e eventual comparação com modelos de carga representativos de tráfego normal.
- Estudo de outras tipologias de tabuleiro e diferentes sistemas longitudinais, nomeadamente tabuleiros contínuos e secções em caixão, no sentido de averiguar as consequências das alterações nestes parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABNT. (2013). *Norma Brasileira 7188: Carga Móvel Rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANEOP, & Deloitte. (2009). *O Poder da Construção em Portugal – Impactos em 2009 e 2010*.
- BSI. (2003). *British Standard: Eurocode 1: Actions on Structures. Part 2: Traffic loads on bridges: British Standard*. London: British Standards Institution.
- Calçada, R. (2001). *Avaliação Experimental e Numérica de Efeitos Dinâmicos de Cargas de Tráfego em Pontes Rodoviárias*. Dissertação de Doutoramento: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CSA. (2006). *Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standards Association.
- Décima terceira alteração ao Código da Estrada. (3 de Setembro de 2013). *Diário da República, n.º 169/2013, Série I de 2013-09-03, Lei 72/2013*.
- Estudo ANEOP revela principais previsões para o sector. (2009). *Caixa Imobiliário*. Obtido de <http://www.caixaimobiliario.pt/artigos/pagina.jsp?id=2936>
- Highways Department. (2013). *Structures Design Manual for Highways and Railways*. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- INVIAS, & AIS. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP 14*. Instituto Nacional de Vías y Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- IRC. (2014). *Standard Specifications and Code of Practice for Road Bridges*. New Delhi: Indian Roads Congress.
- Magalhães, F. (2013). Preliminary Design of Bridges. *Apontamentos das Aulas Práticas da Disciplina de Pontes*. Apresentação PowerPoint: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Manterola, J. (2006). *PUENTES. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos canales y puertos.
- Pereira, R. (2015). *Análise comparativa das ações do tráfego rodoviário definidas em diversos regulamentos internacionais de pontes*. Relatório de Estágio de Mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. (31 de Maio de 1983). *Diário da República, n.º 125/1983, Série I de 1983-05-31, Decreto-Lei 235/83*.
- Regulamento Que Fixa os Pesos e as Dimensões Máximos Autorizados para os Veículos em Circulação. (21 de 06 de 2005). *Diário da República, n.º 117/2005, Série I-A de 2005-06-21, Decreto-Lei 99/2005*.
- Reis, A. (2006). *Folhas da Disciplina de Pontes*. Instituto Superior Técnico.
- SATCC. (2001). *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*. Southern Africa Transport and Communications Commission – Division of Roads and Transport Technology.
- SNiP. (1986). *Construction Norms: Bridges and Culverts*. (USSR State Committee on Construction, Trans.) Moscow: SNiP – National Codes & Standards Of Russia.

